

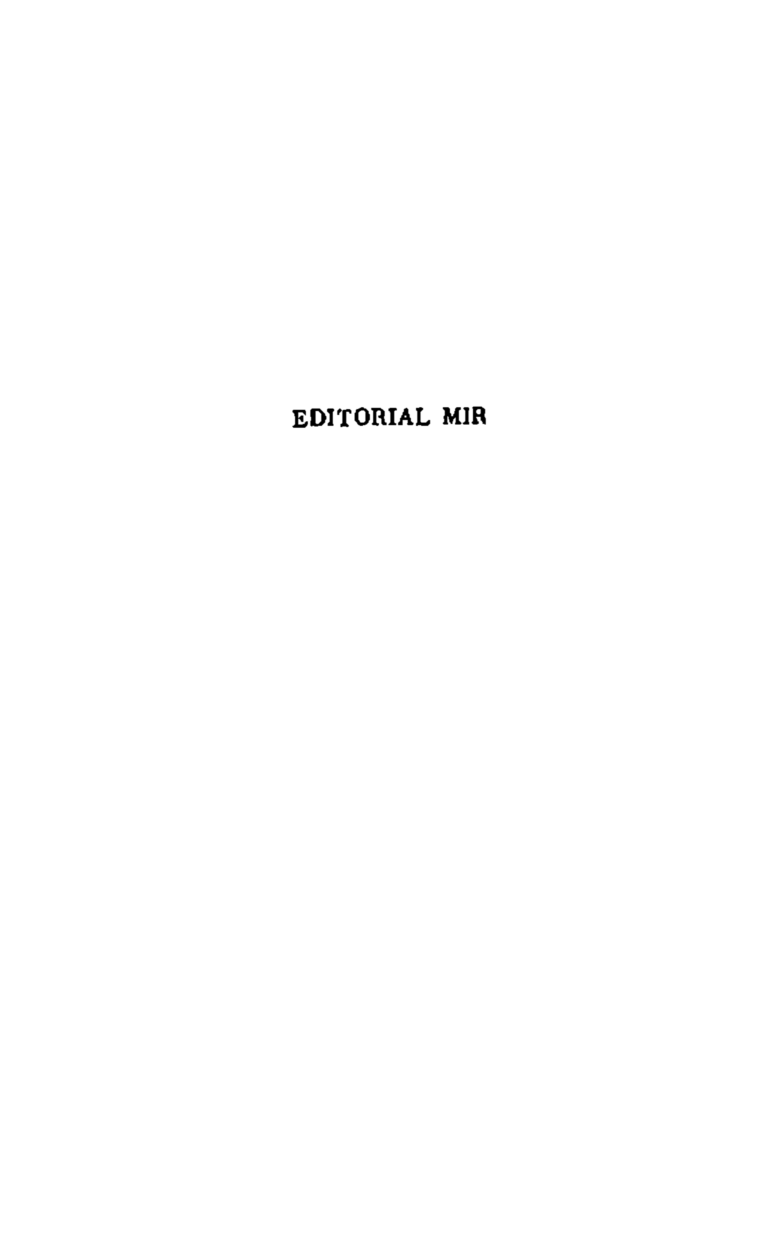
CIENCIA POPULAR

EL FRACASO DE LAS PARADOJAS

I. RADUÑSKAYA

$d_1 - d_2 = \lambda$

EDITORIAL MIR MOSCU



EDITORIAL MIR

И. РАДУНСКАЯ

КРУШЕНИЕ ПАРАДОКСОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЦК ВЛКСМ
«МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ»

I. RADUNSKAYA

EL FRACASO DE LAS PARADOJAS



EDITORIAL
MIR
MOSCÚ

Traducido del ruso
por Julia Gutiérrez Fernández

На испанском языке

Impreso en la URSS 1976

PROLOGO DE LA AUTORA

Hace ya más de diez años que tenemos conocimiento de los vocablos "máser" y "láser". En la actualidad, no sólo les son conocidos a los científicos y periodistas, sino también a los escolares.

Igualmente gozan de gran fama los nombres de Nikolái Básov y Alexandr Prójorov, los primeros sabios que escucharon la radiotransmisión del mundo de los átomos y las moléculas. Ellos fueron coronados, y bien merecido, con gloria, títulos y honores, han sido laureados con los premios Lenin y Nóbel. Son académicos y Héroes del Trabajo Socialista, dirigentes de sus laboratorios, y al mismo tiempo, del Instituto de Física P. N. Lébedev de la Academia de Ciencias de la URSS, mundialmente famoso.

Después de publicar mis primeros libros sobre la historia dramática de los máseres y láseros — "Ideas "locas" y "La transformación del hiperboloide del ingeniero Garin" —, yo, lamentándolo mucho, creía que ya era hora de pasar a otro tema, pensando que había acabado una de las páginas más impresionantes de la historia de la ciencia.

Consideraba también que Básov y Prójorov ya no tenían nada que hacer en la radiofísica cuántica. Como ciencia, ésta parecía haber concluido y, gracias precisamente a sus trabajos, se había transformado de un brazado de paradojas, curiosidades y enigmas en un móvil de la

técnica y la industria, perdiendo su cariz misterioso...

Me preocupaba la suerte de mis protagonistas y al cabo de varios años volví a visitar los laboratorios que ya conocía. ¿Qué fue lo que vi allí?

Muchachos jóvenes que vinieron directamente de la escuela a trabajar con Básov y Prójorov; muchachos a quienes unos años atrás se les llamaba por los diminutivos Kolia, Natasha o Vitia, y que llegaron a ser candidatos a doctor o doctores en ciencias. Tampoco a Básov y a Prójorov se les veía ya ajetrear alrededor de un aparato en una pequeña habitación: actualmente dirigen grandes colectividades independientes.

Mientras tanto, los máseres y los láseres, además de convertirse en un arma de la técnica, eran el escalpelo de la ciencia: ayudaron a descubrir tantos fenómenos inesperados, que a los científicos lo único que les queda es reunir todos sus conocimientos y fuerza para asaltar las propiedades más recónditas de la materia, acerca de las cuales hubiera sido imposible sospechar antes de la aparición del máser y el láser.

Resultaba que lo más interesante estaba por comenzar...

1ª PARTE

LOS REVOLTOSOS

CAPITULO I

LOS ORIGENES

El arranque

Quién sabe si fue el palo que se frotaba contra un taco seco, o fueron el eslabón, el pedernal y la yesca los primeros medios que produjeron el fuego, librando de este modo a nuestros retatarabuelos de la necesidad de mantener constantemente el fuego que les había regalado la naturaleza. Para nosotros es más importante que el hombre aprendió a adquirirlo del Sol. Con este fin utilizó vajilla de vidrio llena de agua o cristales transparentes de cuarzo, pulidos en forma de lenteja, que captaban la luz. ¡El cambio del día y la noche, el calor del Sol, el brillo de la Luna, el fucilazo del rayo y el esplendor de la hoguera! El hombre no podía estar sin pensar en la luz.

Euclides, el fundador de la geometría, fue el primero que escribió un trabajo dedicado a la luz. En su "Optica" formula la ley que determina la conducta de los rayos luminosos, la ley de reflexión de la luz de los espejos: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

El hombre viene utilizando esta ley más de dos mil años, y antes aún ya se sabía que la luz se propaga en línea recta. En los trabajos de Euclides, el rayo de luz era el símbolo de la recta. No obstante, se necesitó un siglo para convencerse de que la "ley de la naturaleza", formulada por el hombre, podía ser infringida.

Ptolomeo, compatriota de Euclides, consideraba la distorsión de los rayos de luz en la atmósfera al realizar sus admirables observaciones

astronómicas. Mas, a pesar de la gran precisión de las mediciones, también él se equivocó. Este estimaba que el ángulo de refracción era proporcional al ángulo de incidencia. Esto, por decirlo así, no se diferenciaba mucho de la realidad si se tienen en cuenta los pequeños ángulos con que trabajaba Ptolomeo.

Durante más de quince siglos, los que se consideraban sabios opinaban que en la óptica todo estaba tan claro como el cristal. Los artesanos pulían cada vez mejor los lentes para las personas que padecían de la vista. Los maestros venecianos y holandeses combinaban sus lentes en anteojos que acercaban magníficamente los objetos alejados y que descubrían detalles asombrosos al examinar objetos desde muy cerca.

Incluso el famoso Galileo, quien perfeccionó el anteojo holandés y dirigió su telescopio hacia el Sol, la Luna y los planetas, por lo visto no se detuvo mucho en pensar cómo funcionaba dicho anteojo.

Solamente treinta años después de que Galileo comunicara a sus conmovidos contemporáneos que el Sol suele tener también manchas y que el planeta Júpiter tiene cuatro lunas, apareció la obra denominada "Dióptica", cuyo autor fue Descartes, filósofo, físico y matemático francés. Este sabio trataba de poner todos los conocimientos, accesibles a él, en concordancia con el cuadro general del universo, creado por él mismo como resultado del análisis crítico de los trabajos de sus antecesores y de las rigurosas construcciones lógicas.

Eran pocos los que aceptaban en serio los trabajos de este oficial frívolo. La reputación del autor no infundía confianza. Descartes, después de terminar el colegio, llevaba una vida de

oficial muy agitada, participando en la Guerra de los treinta años y disfrutando de la vida mundana. Eran pocos los que sabían que Descartes encontraba tiempo para dedicarse a la filosofía y las matemáticas.

Cumplidos los treinta años, sintió afición irresistible a la ciencia y dos años más tarde terminó sus "Reglas para la dirección del espíritu", editadas después de su muerte. Su actividad, hostil a la escolástica y al dogmatismo eclesiástico, le obligó a abandonar su patria e instalarse en Holanda. Aquí vivió veinte años, que fueron los más fructíferos. En 1649, por razones de persecución clerical, tuvo que trasladarse a Suecia, donde murió al poco tiempo.

Las causas

En su "Dióptica", Descartes sistematizó los conocimientos acerca de los fenómenos ópticos que llegaron, casi invariables, de la lejana antigüedad. Todos ellos eran puramente descriptivos. Mas él deseaba descubrir las causas de los fenómenos y hallar en ellos las regularidades intrínsecas. Negaba rotundamente la posibilidad de actuar a distancia. Estaba convencido de que cualquier acción puede transmitirse a través de la presión y los choques. En aquel tiempo, nadie conocía otras fuerzas. Desde su punto de vista, todos los procesos se reducían al desplazamiento espacial de los cuerpos.

En un día de calor, cualquier individuo siente la presión insoportable de los rayos solares. No es de extrañar que Descartes opinara que la luz no es nada más que la transmisión de la presión desde la fuente a través de un medio especial muy fino que llena el espacio. Los sabios

antiguos prepararon una palabra adecuada para denominar este medio: era la palabra "éter". Así es como el éter entró en la ciencia. Descartes describió las propiedades mecánicas del medio, capaz, según su opinión, de transmitir la presión a una velocidad infinita y a cualquier distancia.

Descartes incluyó en su "Dióptica", a la par con la ley de reflexión de la luz, ley que llegó de Euclides, la ley de refracción de la luz, descubrimiento que él mismo había hecho siete años antes de publicarse su obra. Entonces no había costumbre de apresurarse a publicar los descubrimientos, incluso aquellos que refutaban la ley del famoso Ptolomeo, considerada indiscutible durante más de mil quinientos años. Más tarde, resultó que el holandés Snell van Roijen llamado también Snellius había establecido esa misma ley, por vía experimental, diez años antes que Descartes, pero no consideró necesario publicarla.

— Vaya una costumbre — dijo un físico conocido mio después de leer esta parte del manuscrito —. Ahora me doy cuenta de la importancia que tiene el estudio de la historia de la ciencia. ¡Y nosotros nos indignamos cuando la redacción de la revista demora aunque tan sólo sea por un mes la publicación de nuestros artículos! — Después reflexionó un rato y añadió —: No comprendo por qué entonces en los manuales esta ley se llama ley de Snell. El científico no trabaja para sí, es absurdo ocultar los resultados obtenidos. Estos pertenecen a la humanidad y deben publicarse.

Sí, pasaron aquellos tiempos y ahora se cantan otras canciones. Los ritmos son distintos y es diferente la actitud hacia la ciencia y sus creadores. En aquellos tiempos la ciencia iba

ganando terreno poco a poco después del estancamiento lúgubro de la Edad Media. Pasaron casi unos treinta años más hasta que se hizo el siguiente paso, cuando Hooke en su "Micrografía" explicó que la luz eran oscilaciones rápidas y muy pequeñas que atraviesan el éter a la mayor distancia y en el menor tiempo quo puode imaginarse uno. Hooke sabe ya cómo explicar el origen de los colores dol arco iris al pasar la luz blanca a través de un prisma. Deduce de nuevo la ley de refracción de Descartes y Snollius, y dice que el ángulo de refracción depende del color.

Señalaré de pasada, que esto lo tonía que saber dol libro "Los meteoros", de Descartes, en el que se explica ol mecanismo del surgimiento del arco iris: el primer arco iris aparece como resultado de la birrefringencia y una reflexión de la luz en una gota de agua; el segundo arco iris es el resultado de dos refracciones y dos reflexiones. Descartes confirmó incluso su teoría mediante un experimento de la refracción do ia luz en unas bolas de cristal.

Mas Hooko no tenía por costumbre alegar los resultados ajenos.

Veinto y cinco años después de publicarse la obra "Micrografía", aparoció el "Tratado de la luz", de Huygens. El manuscrito de esta obra estuvo guardado durante doce años. No obstante, los descubrimientos que hizo Huygens eran tan importantes que pronto fueron conocidos. En aquellos tiempos los científicos se carteaban entre sí muy gustosamente.

Huygens introdujo en la ciencia el concepto de ondas luminosas como perturbaciones elásticas que se propagan on muchísimas partículas esféricas del éter, oxtraordinariamento pequeñas

y muy duras y que penetran a través de todos los cuerpos. Expuso también el principio general que permite determinar, mediante construcciones geométricas, la dirección de propagación de cualquier proceso ondulatorio.

Huygens fue tal vez el primer representante ilustre de la nueva generación de científicos. Alcanzó extraordinarios éxitos en las investigaciones fundamentales en las matemáticas y la física, mas no fueron menos valiosas sus invenciones y construcciones técnicas. Era un hombre de vastos conocimientos. En los años de su juventud daba preferencia a las matemáticas y a la astronomía. Descubrió el satélite de Saturno y sus anillos. Basándose en los trabajos de Galileo, inventó el reloj de péndulo; después, participando en un concurso organizado por el Almirantazgo inglés, inventó el péndulo-balancín giratorio, artefacto que sirvió de base en la construcción del reloj que no temía al balanceo del buque. En 1663, Huygens fue elegido miembro extranjero de la Real Sociedad Londinense, precisamente el año en que eligieron también a Hooke miembro de dicha sociedad. Conjuntamente con Hooke, Huygens estableció los principales puntos fijos del termómetro: el punto de fusión del hielo y el punto de ebullición del agua.

Rayos ordinarios y rayos extraordinarios

En 1678, Huygens leyó su "Tratado de la luz" a los miembros de la Academia de Ciencias de París. En el tratado se explicaba lo que ocurre con la luz durante la reflexión y la refracción, y en particular, durante la extraña refracción en el espato de Islandia. Siguiendo las tradicio-

nes de Descartes, que exigía el enfoque crítico de cualquier conocimiento, Huygens al principio de su tratado pone de manifiesto un importante error de Descartes. Mediante un cálculo directo, él demuestra que la conclusión referente a la velocidad infinita de la luz, obtenida por Descartes como resultado de las observaciones de los eclipses de la Luna, no es convincente debido a la insuficiente precisión de las observaciones. "Solamente permiten afirmar — señalaba Huygens — que la velocidad de la luz es cien mil veces mayor que la del sonido." Más tarde, Huygens utiliza las asombrosas observaciones del movimiento de los satélites de Júpiter, hechas por Roemer dos años antes con el fin de determinar la velocidad de la luz. Después de hacer los cálculos necesarios y de haber obtenido una magnitud enorme, Huygens exclama: "De todos modos, esto es algo totalmente distinto a la propagación instantánea, ya que la diferencia aquí es la misma que entre una cosa finita y lo infinito".

En sus conceptos sobre la naturaleza de la luz, Huygens se aproxima en muchos aspectos a Hooke: la luz son impulsos elásticos en el éter — opinaba él, mas en ninguna parte utiliza la noción de longitud de onda, ni siquiera llega a suponer que las ondas luminosas tienen un período determinado.

A pesar del carácter geométrico, el método de Huygens, basado en la construcción de frentes de onda esféricos, le permitió, siguiendo las tradiciones de Descartes, deducir las leyes de reflexión y refracción de la luz, que hasta entonces se aceptaban como simples hechos empíricos que no tenían explicación.

Huygens demostró la potencia y la eficacia

de su principio de propagación de la luz, al explicar, valiéndose de cristales de espato de Islandia, el desdoblamiento misterioso del rayo de luz en dos rayos distintos.

Huygens denominó a uno de estos rayos "ordinario", ya que se sometía a la ley de la refracción de Descartes; al otro lo denominó "extraordinario", puesto que infringía dicha ley y se refractaba "irregularmente".

La "birrefringencia" fue descubierta por Bartolin en 1669 y era un fenómeno que a los contemporáneos no sólo les parecía inexplicable, sino que contradecía a todo lo que se había escrito anteriormente sobre la luz, incluyendo a Descartes y a Hooke.

Para Huygens era extraordinariamente importante poder explicar la birrefringencia, pues su principio conducía a la contradicción con Hooke en el punto más esencial, que era, precisamente, la explicación de la ley de refracción de la luz. Tanto el uno como el otro deducían la ley de refracción basándose en la diferencia de las velocidades de la luz a ambos lados del límite de dos medios. Por ejemplo, el límite entre el aire y el vidrio. Aquí, el índice de refracción, según Huygens, se expresa mediante la relación que hay entre la velocidad de la luz en el primer medio y su velocidad en el segundo. Sin embargo, a Hooke le resultaba una relación inversa. Y las posibilidades experimentales no permitían efectuar la medición de la velocidad de la luz en condiciones de laboratorio.

Por lo demás, podemos comprender por qué Huygens no llegó a elaborar hasta el fin la teoría ondulatoria de la luz. El partía de la analogía que existe entre muchos fenómenos ópticos y acústicos. Y la acústica, a su vez, trata de las

ondas sonoras. Pero al propagarse el sonido, las partículas de aire oscilan a lo largo de la dirección, por la que corre la onda. Si la luz es realmente onda longitudinal en el éter, resulta que es totalmente inexplicable el fenómeno de la polarización de la luz, descubierto por el propio Huygens al investigar la birrefringencia. La cosa es que ambos rayos, en los que se desdobla el rayo de luz que cae sobre el cristal de espato de Islandia, son totalmente distintos y se refractan de modo diferente. En la acústica no hay ni puede haber cosa semejante.

Las ondas sonoras no son capaces de propagarse como la luz. Todo el mundo puede convencerse de que la luz solar pasa a través de un agujero en el postigo, adquiriendo la forma de un rayo estrecho, restringido con gran exactitud. En cambio, el sonido invade todo el local al pasar incluso a través de un estrecho canal en un muro de piedra.

No, Huygens, a quien se le considera el creador de la teoría ondulatoria de la luz, dio solamente el primer paso. Ni siquiera intentó explicar el fenómeno de la difracción, descubierto por Grimaldi: fenómeno en que la luz contornea los obstáculos, aunque la obra de este científico, denominada "Physicomathesis de lumine, coloribus et iride", (Tratado físico-matemático sobre la luz, los colores y el arco iris) había aparecido mucho antes que el tratado de Huygens.

Las ideas ondulatorias ya flotaban entonces en el aire y Grimaldi, quien descubrió que la luz contornea los obstáculos, no pudo eludir el concepto de las ondas. Pero, a su modo de ver, la luz no eran ondas propiamente dicho; él se imaginaba que la luz era un líquido que se movía con

gran rapidez a través del espacio y de los cuerpos transparentes. En la imaginación de Grimaldi se dibujaba cómo las ondas aparecen en un líquido luminoso al chocar éste contra el borde de un obstáculo, lo cual obliga al líquido luminoso filtrarse tras el obstáculo, igual que el agua del arroyo contornea las piedras. Grimaldi, valiéndose del derecho de descubridor, denominó a este fenómeno "difracción", quedando este nombre en la ciencia para siempre y adquiriendo, al salir lejos de los límites de la óptica, un contenido totalmente nuevo.

Por lo demás, no sólo llegó hasta nuestros días el nombre inventado por Grimaldi. Este sabio fue el primero que compuso el mapa de la Luna y dio nombres a muchos detalles de su parte visible. Estos nombres llegaron también hasta nuestros días.

El titán

La ocasión quiso que en ese mismo año de 1665, cuando habíase publicado la edición póstuma del tratado sobre la luz de Grimaldi y la "Micrografía" de Hooke, terminara el "Trinity College" de Cambridge y obtuviese el grado de bachiller Isaac Newton, hijo de un granjero y huérfano en aquel entonces. Ya en los años estudiantiles, el joven, poco sociable, comenzó a elaborar ideas que le ensalzaron por encima de los demás naturalistas del mundo. Discutía mucho con Hooke, quien trataba a veces de mostrar que en algunas cosas él había anticipado a Newton. Es más, había otros científicos que acusaban también a Hooke de querer apropiarse de los éxitos ajenos. La consecuencia de estas

discusiones condujo, en particular, a que Newton publicara sus trabajos relacionados con la óptica después de la muerte de Hooke.

Newton opinaba que la luz era un flujo de partículas-corpúsculos. Sin embargo, él comprendía mejor que sus contemporáneos la importancia que tenían las propiedades periódicas de la luz. Pues, al observar los anillos de colores, — anillos que todos pueden ver poniendo un lente de cristal algo convexo en una lámina plana — y medir el tamaño de éstos, Newton pudo calcular la longitud de las ondas, correspondientes a los distintos colores. No obstante, Newton comprendía que era imposible explicar la birrefringencia ni describir la propagación rectilínea de los rayos luminosos al asemejar las ondas de luz a las ondas sonoras. Todo esto obligó a Newton a que hiciera una conclusión sobre la materialidad de la luz y considerara que ésta es un flujo de corpúsculos.

Mas un estudio profundo del fenómeno que representa la difracción de la luz y su polarización durante la birrefringencia le llevó a la conclusión de que era insuficiente la simple teoría corpuscular. Entonces es cuando dio un gran paso, intentando unificar las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz en un solo fenómeno.

En la teoría sintética, la luz continuaba presentándose, igual que antes, como un flujo de partículas que salen de la fuente de luz, mas se suponía que el movimiento de las partículas a través del éter excita ondas en él. Las ondas adelantan a las partículas que las engendran y, al tropezar contra un obstáculo, obligan a las partículas a desviarse del camino, contorneando el obstáculo. Las partículas que vuelan lejos del

borde del obstáculo se mueven en línea recta, sin experimentar influencia alguna.

Semejante teoría podía explicar todos los fenómenos ópticos conocidos por Newton. Sin embargo, tuvo que rechazarla, ya que la existencia del éter no concordaba con la existencia del sistema solar. ¡Newton no llegó a comprender por qué el éter no obstaculizaba el movimiento de los planetas!

Hoy día, desde la cumbre del siglo XX, nos es fácil decir que la penetración en la esencia de la luz es una tarea insuperable para una sola persona, por magna que sea. No obstante, la grandeza de Newton se manifestó tanto en sus logros como en sus errores. Por ejemplo, después de estudiar el proceso de descomposición de la luz blanca en sus colores componentes y de obtener la luz blanca mediante la fusión de la banda del arco iris, Newton vinculó estos fenómenos con uno de los tipos de distorsión de la imagen en los lentes. Dicha distorsión — el surgimiento de orladuras irisadas en los bordes de la imagen — le parecía insuperable. Y... Newton crea el telescopio reflector, exento de esta insuficiencia. Los telescopios reflectores siguen siendo hasta el momento los aparatos astronómicos más potentes.

La investigación de la aberración cromática y la historia del telescopio reflector permiten añadir algunos rasgos a la característica personal de Newton. El físico belga Lucas adquirió popularidad debido a que descubrió, después de repetir el experimento de Newton respecto a la refracción de la luz en un prisma, cierta divergencia numérica entre sus resultados y los de Newton. El sabio inglés afirmaba que Lucas estaba equivocado, sin darse el trabajo de repe-

tir el experimento. Ahora sabemos que utilizaban prismas de distintas clases de cristal, pero lo difícil de comprender para nosotros es por qué esto ha quedado desapercibido.

Newton creó el telescopio reflector basándose solamente en sus propias investigaciones y cálculos. Mas ello no significa que haya sido el primero. En aquellos tiempos existían telescopios bastante grandes, los cuales no poseían lentes en absoluto y ya en las obras de Galileo se hacía mención acerca de los telescopios reflectores.

La grandeza de Newton se manifestaba también en que comprendiendo las dificultades de la teoría corpuscular, incapaz de explicar las propiedades periódicas de la luz, y no pudiendo aceptar la existencia del éter, él no tomó aquí una posición determinada y no reprimió ni restringió con la autoridad de su nombre las investigaciones ulteriores.

Pero siempre hay católicos que quieren ser más beatos que el propio Papa. Después de la muerte de Newton, poco a poco fue olvidándose que en la última edición de su "Optica" él aducía siete argumentos a favor de la teoría ondulatoria y solamente uno en contra de ella. Los discípulos elevaron a lo absoluto su teoría corpuscular y ésta mantuvo una posición dominante hasta principios del siglo XIX, frenando así el fomento de la ciencia.

El renacimiento

El viraje se produjo al resucitar Young la teoría ondulatoria para explicar la interferencia, mientras que Fresnel, con la ayuda de ésta, resolvió por fin el problema de la difracción.

Thomas Young manifiesta su interés por la

física y las matemáticas a la edad de ocho años, cuando la mayoría de los niños tan sólo empiezan a estudiar el alfabeto y la aritmética. Al cabo de un año, estudia idiomas, incluyendo el latín, el griego, el hebreo antiguo y el árabe. En ese tiempo, su afición principal era la botánica. Parecía que al niño le esperaba la suerte de la mayoría de los niños prodigios: la popularidad durante la infancia y el rápido olvido. Pero Young evitó esa suerte tan penosa. A los veinte años publicó "Observaciones del proceso de la vista". Aquí, basándose en sus experimentos, puso en tela de juicio la teoría corpuscular de la luz que, sin duda alguna, se identificaba ya con el nombre de Newton, y se manifestó a favor de la teoría ondulatoria.

Su atrevimiento provocó escándalo. Bajo la presión de la crítica de los newtonianos ortodoxos, Young reconoció que sus opiniones eran infundadas y dejó de dedicarse a la óptica por algún tiempo. Trabajaba intensamente, preparándose para obtener el diploma de doctor en medicina.

No obstante, las ideas sobre la naturaleza de la luz no le daban sosiego. El tratado "Experimentos y problemas del sonido y la luz", publicado por Young en el año de 1800, permite, en parte, echar una ojeada no sólo a su gabinete físico, sino también a esa esfera puramente sicológica que hoy día suele denominarse laboratorio creador del científico. Young menciona una parte del tercer volumen de la famosa obra de Newton — "Philosophia e Naturalis Principia Mathematica" —, donde se trata de los trabajos del astrónomo Halley, quien observó las mareas irregularmente altas que surgían en algunos lugares del archipiélago de Filipinas. Newton se-

ñalaba que esto era debido a la superposición mutua de las olas de las mareas.

Al verdadero actor le es suficiente una palabra del apuntador para que pueda declamar bien un monólogo complicado, si el artista está, desde luego, lo suficientemente preparado para jugar el papel.

¡Young estaba preparado! Un ejemplo particular, referente a la teoría de las mareas, teoría que tan alejada está de la óptica, fue la sacudida que originó la avalancha.

"Imagínese una serie de olas iguales que van corriendo por la superficie de un lago... Ahora imagínese que por cualquier otra causa análoga se suscitará una segunda serie de olas del mismo tamaño que estén pasando... con la misma velocidad y al mismo tiempo que el primer sistema de olas. Un sistema no perturbará al otro, pero sus acciones se adicionarán si es que ... las cumbres de un sistema de olas coinciden con las cumbres del otro sistema; si las cumbres de un sistema de olas son situadas en los sitios de hundimiento del otro sistema, estas dos cumbres rellenarán con gran exactitud los hundimientos y la superficie del agua quedará lisa. Así, pues, mi opinión es que semejantes fenómenos suceden también cuando se mezclan dos porciones de luz; y a esta superposición yo la denomino ley general de la interferencia de la luz".

Young confirma su conclusión, puramente especulativa, con un experimento simple y evidente. Este magnífico experimento cualquiera puede repetirlo. En un pedazo de cartón se hacen con un alfiler dos agujoritos y se iluminan con la luz del Sol que pasa a través de una rendija en la contraventana cerrada. En la pared opuesta o en una pantalla blanca especial apa-

rece una alternación de franjas claras y oscuras: las claras surgen allí donde las ondas luminosas que pasan a través de ambos agujeros se superponen de modo acorde (en fase), mientras que las oscuras surgen donde se extinguen unas a las otras (se superponen en antifase).

Al cerrar uno de los agujeros, las franjas desaparecen. Quedan solamente los anillos de difracción, que Grimaldi hubiera observado entonces. Desaparecen también las franjas al abrir la contraventana, en el momento que el estrecho haz luminoso, incidente sobre los dos agujeros, es sustituido por uno ancho. Así era cómo Grimaldi realizaba sus experimentos y, naturalmente, no pudo descubrir las franjas.

El trabajo de Young fue acogido con desconfianza; sus compatriotas — los ingleses — se reían del diletante que había atentado contra la gran herencia de Newton. Pero ahora Young no pensaba capitular.

Un haz de ondas

Al mismo tiempo que Young e ignorando los trabajos que éste realizaba, el francés Agustín Fresnel, que era ingeniero de caminos, estaba dedicándose también a las investigaciones ópticas. Fresnel participó en la lucha contra Napoleón y durante las depuraciones de "Los cien días", llevadas a cabo después del regreso de Napoleón de la isla de Elba, se marchó a la aldea. Aquí comenzó a realizar investigaciones sistemáticas en el campo de la óptica. Sus recursos eran tan limitados como escasas sus posibilidades experimentales. Mas su gran intelecto y la costumbre de contentarse con los simples métodos matemáticos le permitieron obtener re-

sultados extraordinarios, pese a que los experimentos eran bastante primitivos. Además, la destreza ingenieril y la costumbre de exigir resultados seguros hacían que sus experimentos fuesen irreprochables.

Fresnel comenzó por estudiar las sombras de los objetos pequeños. Esto puede hacerse en la forma más pura con ayuda de alambre fino. Y Fresnel descubrió el sistema de franjas alternativas que sustituían el límite bien marcado de la sombra, el cual era de esperar partiendo de la teoría corpuscular. Tan pronto que aproximaba el borde de una pantalla opaca a uno de los lados del alambre, desaparecían las franjas brillantes dentro de la sombra. Quedaban solamente franjas oscuras en la parte iluminada, que fueron observadas ya por Grimaldi.

Fresnel explicó el surgimiento de las franjas brillantes dentro de la zona de sombra por medio de la superposición de las dos partes de la onda luminosa que contornea el alambre por ambos lados. Así es cómo llegó a comprender, por sí mismo, la interferencia de la luz.

Más tarde, después de enterarse de los trabajos que había realizado Young y de sus experimentos con los dos agujeros, Fresnel, deseando separar completamente el fenómeno de la interferencia del fenómeno de la difracción en los bordes de los agujeros, puso el experimento con dos espejos y un biprisma. Esto le permitió descomponer y unir de nuevo las ondas luminosas que pasaban a través de una estrecha rendija y observar magníficos cuadros interferenciales que hoy día ya conoce cualquier escolar.

Fresnel unificó el principio de la interferencia con método de las ondas elementales y el de la onda envolvente, introducido por Huygens.

Se obtuvo un sistema acabado. Además, las ondas elementales y su envolvente no eran ya una noción puramente geométrica ni un método de construcción, como lo suponía Huygens, sino que llegaron a ser la propia esencia de la onda luminosa. Fresnel no se limitó a esto y formuló matemáticamente la teoría ondulatoria de la luz.

Demostró también que algunos sectores del frente ondulatorio que parte del punto luminoso, engendran ondas secundarias, pero de tal modo que éstas se extinguen unas a las otras: todas, excepto una pequeña parte central, situada en la recta que une la fuente de luz con el punto luminoso.

Así fue resuelta la paradoja secular que cerraba el paso a la teoría ondulatoria de la luz. Habíase hallado una explicación respecto a los haces rectilíneos luminosos que surgen y siguen siendo estrechos a pesar de la naturaleza ondulatoria de la luz. He aquí: todas las ondas que se desvían de la recta, se extinguen unas a las otras completamente, sin obstaculizar la propagación del rayo estrecho, constituido por sectores centrales de ondas que se propagan en línea recta.

Fresnel pudo calcular matemáticamente todos los detalles del proceso que conduce a que las ondas luminosas contorneen los bordes de los objetos, indicando, en particular, cómo este proceso depende de la longitud de onda. Así fue construida, por fin, la teoría de la difracción.

Los grandes matemáticos Laplace y Poisson, así como algunos físicos, consideraban al ingeniero Fresnel diletante en las matemáticas; criticaron también sus primeros artículos sobre la difracción debido a la ausencia de la rigurosidad matemática.

La paradoja

Al cabo de varios años, Fresnel formula de nuevo sus resultados que presenta a un concurso organizado por la Academia de Ciencias de París. El trabajo lo examina una comisión especial integrada por Laplace, Poisson, Arago, Biot y Gay-Lussac. Los tres primeros son newtonianos convencidos, partidarios de la teoría corpuscular de la luz. Arago se inclina hacia la teoría ondulatoria de la luz, mas, como experimentador, no pudo oponerse a la irreprochable lógica matemática de Laplace y Poisson. Gay-Lussac investigaba las propiedades de los gases, se dedicaba a la química y a muchas otras cuestiones particulares que no tenían nada que ver con la óptica. Los académicos comprendían que Gay-Lussac no era una autoridad en lo referente a los trabajos de Fresnel, mas, por lo visto, le incluyeron en la comisión contando con su imparcialidad e irreprochable honradez. Por lo demás, la conciencia científica de todos los miembros de la comisión quedaba fuera de cualquier sospecha.

Poisson estudió tan a fondo las memorias de Fresnel (en aquellos tiempos el término "Memorias" equivalía a lo que ahora denominamos "monografía"), que pudo descubrir una sorprendente conclusión que se deducía de sus cálculos. De éstos se infería que en el centro de la sombra de un disco opaco con medidas adecuadas debiera haber una mancha clara. Las manchas tenían que desaparecer y aparecer nuevamente a medida que se iba apartando el disco de la pantalla en la que se observaba este fenómeno.

Es más, en el eje que unía la fuente puntual de luz con el pequeño agujero, debiera observarse también la alternación de la luz y la sombra.

Era imposible concordar semejante paradoja con la noción acerca de los corpúsculos que vuelan a lo largo del rayo de luz.

La comisión aceptó la opinión de Poisson de que esto contradecía al sentido común y propuso a Fresnel que confirmase su teoría con un experimento. La comisión opinaba que ese experimento podría solucionar la antigua discusión entre la teoría ondulatoria y la teoría corpuscular.

Arago ayudó a Fresnel a realizar el experimento decisivo. El "sentido común" fracasó, Fresnel fue premiado y con esto parecía que la teoría ondulatoria de la luz había triunfado para siempre. No obstante, de la vorágine del océano científico asomó un escollo que amenazaba con hundir el maravilloso buque de la teoría ondulatoria de Fresnel.

Un callejón sin salida

El físico Malus, poco conocido en la actualidad, descubrió que la luz no sólo se polariza al atravesar el espato de Islandia, sino también al producirse una simple reflexión o refracción en el límite de dos medios. El descubrimiento de Malus se explicaba fácilmente mediante las propiedades de los corpúsculos de luz a los que Newton atribuyó asimetría o polaridad. Según su expresión, cada rayo de luz posee dos lados. Por eso los fenómenos de polarización se consideraban entonces como el argumento más poderoso a favor de la teoría corpuscular.

La brillante intuición de Fresnel le obligó a hacer caso omiso a la autoridad de Newton. Siguió el camino de Huygens, de quien adoptó la analogía entre las ondas luminosas y las acús-

ticas. El comprendía que la teoría ondulatoria era incapaz de explicar los experimentos de Malus, así como todo aquello que se sabía antes y después de él referente a la polarización de la luz, si no se consideraba que las ondas de luz eran transversales, semejantes a las que podemos ver en la superficie del agua. Tal suposición la exponían ya Grimaldi y Hooke, pero en lo demás la idea que tenían éstos sobre las ondas luminosas era ingenua y confusa. Mas en los tiempos de Fresnel nadie pensaba ya en el carácter transversal de las ondas luminosas. Tampoco Fresnel pensaba en eso. Sus primeros artículos, informes y cartas no nos permiten apreciar claramente si él intentaba, quedándose dentro de los marcos de la hipótesis de las ondas longitudinales, dominar el problema de la polarización o simplemente menospreció esta dificultad en aras de una explicación de todas las demás propiedades de la luz por él conocidas. Era evidente que Fresnel estaba convencido de la inconsistencia de la teoría corpuscular. La explicación newtoniana respecto a la polarización le parecía tan poco convincente que la estimaba irreal. Y si esto era así, él no consideraba que el único pecado de la teoría ondulatoria fuese un pecado mortal.

Es sabido que Biot y Arago realizaron también una serie de magníficas investigaciones en la rama de la polarización de la luz. Los trabajos de Biot fortalecieron extraordinariamente su seguridad en que la idea de la naturaleza corpuscular de la luz es justa. Arago descubrió la polarización de la luz difusa del cielo, así como la polarización cromática, mas, como consideraba que lo importante era descubrir solamente nuevos hechos y confiaba que con el tiempo éstos se limitarían en los márgenes de la futura teoría,

prefirió no reflexionar ante las dificultades que le parecían infranqueables. Arago, junto con Fresnel, estudiaba de manera sistemática la interferencia de los rayos polarizados. Durante la colaboración conjunta establecieron que dos rayos de luz polarizados en planos paralelos son capaces de interferir entre sí, mientras que los rayos polarizados perpendicularmente ¡jamás se extinguen uno al otro!

Para poder comprender todo el dramatismo de la situación surgida, es necesario detenerse ante el punto de vista de los sabios del primer cuarto del siglo pasado. Pues al negarse de la teoría corpuscular de la luz, sólo les quedaba un camino: considerar que la luz eran ondas de éter. Y en aquel entonces preferían no hablar de las propiedades del éter. Ya pasaron los tiempos cuando era discutible la dimensión y la forma de las partículas del éter y opinable si el mismo estaba compuesto de partículas o si era un líquido denso. El experimento, ese ídolo de los tiempos modernos, no proporcionaba razón alguna para semejantes opiniones. Los hombres de ciencia adoraban los hechos. Lo único sabido era que el éter no obstaculiza el movimiento de los cuerpos, como tampoco la rotación secular de los planetas ni el movimiento de los cuerpos pequeños, cuya aceleración y velocidad puede variarse y medirse durante el experimento.

Por la analogía con la acústica, se comprendía que el éter, ese finísimo medio imponderable, era capaz de transmitir aquel proceso que nosotros percibimos como luz. El famoso Ampere, uno de los fundadores de la teoría de la electricidad, ya en 1815 le dijo a Fresnel que el fenómeno de la polarización podía comprenderse, suponiéndose que las oscilaciones luminosas del éter eran

transversales, a diferencia de las ondas sonoras en el aire, cuyas partículas oscilan en dirección de la propagación del sonido. Esta idea le pareció a Fresnel totalmente absurda. ¡Pues las oscilaciones transversales son posibles solamente en los cuerpos sólidos!

Young, enterado de los experimentos que realizaron Arago y Fresnel con la luz polarizada, pensó también en las oscilaciones transversales del éter, mas se limitó a escribir sobre "movimiento transversal imaginario". Por sus artículos y cartas no es posible establecer si él seguía aún asustado por la acogida que habían tributado sus compatriotas a la teoría de la interferencia, o si a él mismo le parecía demasiado fantástica la idea sobre las oscilaciones transversales del éter. Durante varios años, los partidarios de la teoría ondulatoria sintieron su flojedad ante el enigma de la polarización de la luz, procurando dejar a un lado este callejón sin salida. Los partidarios de la teoría corpuscular cantaban victoria.

El salto

Había que tener mucho coraje para dar el siguiente paso en estas condiciones, mas Fresnel lo dio. Se decidió a hacerlo en 1821, después de muchos años de intentos infructuosos.

La luz son oscilaciones transversales del éter, señalaba Fresnel. Arago, amigo y colaborador suyo, no deseó adherirse a esa hipótesis y se negó ser coautor del sedicioso artículo, pues, al reconocer el carácter transversal de la luz, tenía que aceptar también que el éter, tan imponderable y omnipenetrante, ¡es más duro que el acero! ¡Más duro que el acero, pero penetra a través de

todos los cuerpos o los deja pasar libremente a través de sí! Tal cosa parecía imposible en aquel tiempo de reinado absoluto de la mecánica. A Fresnel le opuso resistencia el frente unido de los newtonianos y los partidarios de su propia teoría ondulatoria. En los años siguientes, Fresnel, que trabajaba completamente aislado y, además, chocaba a veces con una desaprobación abierta, reconstruyó totalmente su teoría ondulatoria de la luz.

Cuando hizo modificaciones en las ecuaciones, modificaciones que reflejaban el carácter transversal de las ondas luminosas, se comenzó a obtener de ellas, como corolarios, descripciones de todos los fenómenos conocidos, relacionados con la polarización de la luz. Hubo también, naturalmente, dificultades, como son, por ejemplo, las relacionadas con el éter. Para superarlas, Fresnel introdujo la única hipótesis que fue un gran salto en comparación con todas las variantes de la teoría corpuscular de la luz, donde hubo que incluir una serie de hipótesis complementarias, específicas para casi todos los fenómenos nuevos, que se contradecían, en parte, una a la otra y que, a pesar de todo, aseguraban en muchos casos tan sólo una coincidencia muy aproximada con el experimento.

La única hipótesis de Fresnel consistía en que, aunque el éter no influía de manera alguna en el movimiento de los cuerpos materiales, los cuerpos en los que él penetraba variaban las propiedades mecánicas del propio éter. Cuanto más denso sea el cuerpo, tanto menor será la velocidad de las oscilaciones transversales del éter dentro del mismo. Basándose en tal hipótesis, Fresnel construyó una teoría matemática que explicaba, en particular, el secreto multisecular

de la refracción de la luz. La onda luminosa que pasa del éter libre al éter que se encuentra en una materia, retorna en parte y sólo en parte penetra dentro. Si la onda cae en el límite de la materia formando un ángulo, su parte reflejada sale de la superficie con el mismo ángulo (Euclides), y la parte que penetra en el interior de la materia se refracta de acuerdo con la ley de Descartes y Snell.

Pero a diferencia de las leyes puramente cualitativas, conocidas anteriormente, las fórmulas de Fresnel predecían cómo se distribuirá la energía de la onda incidente entre la onda reflejada y la refractada. Y el experimento confirmó con gran exactitud la predicción para todos los medios transparentes y para cualquier ángulo de incidencia en el límite del medio.

De la teoría de Fresnel se deducía también la dependencia que existía entre la velocidad de la luz y las propiedades del medio. Igual que en las otras variantes de la teoría ondulatoria, también aquí se suponía que la velocidad de la luz era máxima en el éter libre (en el vacío).

Sólo al cabo de un cuarto de siglo Foucault pudo efectuar una demostración evidente acerca de la certeza de esa predicción. La velocidad de la luz que él midió en el agua constituía sólo 3/4 partes de la velocidad de la luz en el aire. Pero Fresnel no vivió hasta el triunfo de su teoría.

A Fresnel le tocó la gran suerte de luchar y triunfar. También surgían dificultades antes de romper sus relaciones con Arago, cuyo motivo eran sus ideas acerca de las oscilaciones transversales del éter, pues la teoría ondulatoria, basada en el concepto del éter, debía contestar, en cualquiera de las variantes, a la pregunta sobre el

movimiento del éter. ¿Es inmóvil por doquier o sólo la parte que se encuentra dentro de los cuerpos se mueve junto con ellos? En 1725, Bradley, que estudiaba la posición de algunas estrellas, descubrió que durante la culminación, es decir, al pasar éstas a través del plano del meridiano, parecía que estaban desviadas hacia el sur. Las observaciones realizadas durante tres años le demostraron que las inmóviles estrellas describían como si fuese una elipse en la esfera celeste. Bradley explicó acertadamente que este fenómeno, denominado más tarde "aberración", era originado por la adición de la velocidad de la luz que viene de las estrellas y la velocidad de movimiento de la Tierra por su órbita. Con esto quedaba demostrado definitivamente el carácter finito de la velocidad de la luz.

Arago, que era un magnífico experimentador, comprendió que la luz de las estrellas podía ayudar a realizar una comprobación decisiva en cuanto a la justedad de la teoría corpuscular de la luz. El comprobó si el movimiento de la Tierra influía en la refracción de la luz de las estrellas. Obtuvo resultados negativos, los cuales le convencieron de que era preciso rechazar la teoría corpuscular. Mas, ¿cómo obrar respecto a la teoría ondulatoria? Arago se dirigió a Fresnel con esta pregunta.

Un compromiso

La respuesta decía: "Efectivamente, tanto la ausencia de la influencia del movimento de la Tierra en la refracción como el fenómeno de aberración pueden explicarse con facilidad si se considera que los cuerpos móviles arrastran tras sí el éter, pero no todo, sino una parte solamen-

te". Esta hipótesis única permitió a Fresnel explicar todos los fenómenos ópticos que se conocían entonces, relacionados con el movimionto de los cuerpos. La hipótesis se confirmaba también con el efecto Doppler, descubierto más tarde, que consistía en la variación del color de una radiación o del tono del sonido en dependencia del movimiento del foco emisor o del observador.

Fizeau confirmó la hipótesis de Fresnel midiendo la velocidad de la luz al pasar por el agua, cuando iba a favor de su corriente y en contra de ésta. A últimos del siglo pasado, el magnífico experimentador Michelson obtuvo semejante resultado. Sin embargo, a muchos les parecía que la hipótesis del arrastre parcial era bastante artificial. Stokes había intentado ya formular una hipótesis de compromiso, a saber, el éter en los cuerpos se arrastra totalmente; alejado de los mismos, él permanece inmóvil. No obstante, esto era demasiado complejo.

Fresnel había fallecido hacía tiempo, sin embargo, nadie de sus sucesores podía encontrar salida de las contradicciones. A pesar de la confusión, los resultados de las investigaciones de las propiedades del éter, realizadas por Fresnel, resultados que hoy día solamente representan interés histórico, no sólo conservaron su importancia en la óptica, sino que sirvieron de base a una nueva rama de la ciencia, la teoría general de la elasticidad, desarrollada después de Fresnel por matemáticos tan eminentes como Cauchy, Poisson, Green y Lamé.

No obstante, igual que otras teorías revolucionarias, la teoría de Fresnel continuó durante mucho tiempo sufriendo resistencia por parte de la vieja generación de científicos, educados en

las ideas de la teoría corpuscular de la luz. Puede decirse que la especulación en torno a la autoridad de Newton provocaba el estancamiento de la óptica, tal vez comparable únicamente con el entumecimiento multisecular de la ciencia, debido a la influencia hipnotizadora de la grandeza de Aristóteles.

Brewster, quien hizo una serie de importantes descubrimientos en la óptica de los cristales, bien conocido a los actuales alumnos por el extraordinario ángulo de Brewster, mediante el cual es polarizado totalmente el rayo reflejado y quien conquistara popularidad entre sus contemporáneos por la invención del caleidoscopio, un juguete que ahora es anónimo, ese Brewster negaba la teoría de Fresnel, puesto que esa teoría atribuía a Dios "la burda idea de rellenar con éter todo el espacio con el único fin de crear la luz".

Arago fue el primero que se enteró por medio de Fresnel de la necesidad de reconocer el carácter transversal de las oscilaciones del éter. Rechazó rotundamente esa idea y no se reconcilió con ella hasta pasado incluso un cuarto de siglo, a pesar del experimento de Foucault, mencionado anteriormente, que confirmaba el importante efecto de la teoría acerca de la reducción de la velocidad de la luz en los cuerpos. Arago opinaba, y con razón, que semejante conclusión se deduce también de las teorías ondulatorias anteriores. Biot rechazó durante toda su vida la teoría de Fresnel. Sin embargo, eran cada vez más los físicos jóvenes que apoyaban a este sabio.

¡Abajo el éter! ¡Abajo los corpúsculos!

Sólo uno de los científicos de la vieja generación rindió homenaje a la intuición y la insistencia de Fresnel. Este sabio era Hamilton, matemático y astrónomo irlandés. A él le pertenecen magníficas obras en la teoría de números complejos y de la mecánica. Se interesaba también por los principios generales del desarrollo de la ciencia.

Tal vez fuera Hamilton el primero en destacar de manera precisa dos fases características para el desarrollo de cada una de las ramas de la ciencia. El hombre descubre primero los hechos desconocidos y los sistematiza, hasta que logre descubrir en el cúmulo primario de fenómenos desligados algunas regularidades que abarcan el grupo de hechos. Así es como la ciencia avanza poco a poco hasta comprender la unidad intrínseca de los diversos fenómenos y procesos. Luego puede construirse ya una teoría que no sólo explique desde un punto de vista único todo lo conocido anteriormente, sino que también sea capaz de predecir los fenómenos y regularidades desconocidos. Hablando de un modo más preciso, puede decirse que el científico, en la primera fase de la cognición, asciende de los hechos aislados a las leyes; en la segunda fase desciende de las leyes al efecto. El arma de la primera fase es la inducción y el análisis; el de la segunda fase, la deducción y la síntesis. En la primera fase, el papel principal lo juegan la fantasía y la valentía; en la segunda, la lógica y la rigurosidad.

Fresnel dio un salto sorprendente de la primera fase a la segunda. Había que poseer enorme facultad de imaginación y mucha valentía para

prever las oscilaciones transversales en el éter invisible o intangible, a pesar de las evidentes contradicciones con el sentido común, que surgían de esta suposición. Todo ello exigía un trabajo enorme, casi insuperable para un hombre consumido por la tuberculosis y con tan sólo una preparación a nivel de ingeniero, para poder construir el edificio matemático de la teoría y obtener de ésta corolarios antes desconocidos. Por su inclinación personal y su preparación científica, Hamilton pertenecía al grupo de personas cuya esfera era la rigurosidad matemática. A él le molestaba la necesidad de tener que reconocer a la vez la imponderabilidad y la dureza absoluta del éter. No podía reconciliarse con las numerosas hipótesis contradictorias de la teoría corpuscular de la luz. En el trabajo de Fresnel le atraía la unidad interna. Sentía que el éter elástico, del que partía Fresnel, era, en esencia, innecesario. Hamilton decidió crear una teoría matemática formal de la luz, teoría que no estuviese sujeta a ningún modelo concreto. Deseaba que esta teoría partiese del mínimo de los principios generales y que describiera, basándose en ellos, los hechos conocidos.

El gascón

Hamilton escoge en calidad de punto de partida el principio de Fermat, quien al final de su vida llega a afirmar que la luz se propaga por la vía más simple. Fermat, contemporáneo de Descartes y jurista de profesión, era un eminente matemático que adelantó en muchas cosas a sus contemporáneos. Es conocido entre los amplios círculos por su famoso teorema, cuya resolución nadie ha logrado obtener hasta el momento.

La esencia del teorema es muy sencilla. Fermat afirmaba que la ecuación elemental $x^n+y^n=z^n$, donde n es un número entero, mayor que dos, no puede satisfacerse con ningún número entero positivo. Cualquiera puede convencerse de que la afirmación de Fermat es justa. No hay más que probar. Mas ¿por qué ocurre así?

En su tiempo, se proponía un gran premio por la demostración del teorema, pero los matemáticos lograron que se revocase, pues les sofocaba la obligación de tener que examinar una cantidad tan grande de "demostraciones" que ingresaban de los amantes de dineros de sacristán, a quienes les atraía la sencillez aparente del problema. Hoy día está claro que el teorema de Fermat es imposible demostrarlo sin crear nuevos y profundos métodos en la teoría de las ecuaciones.

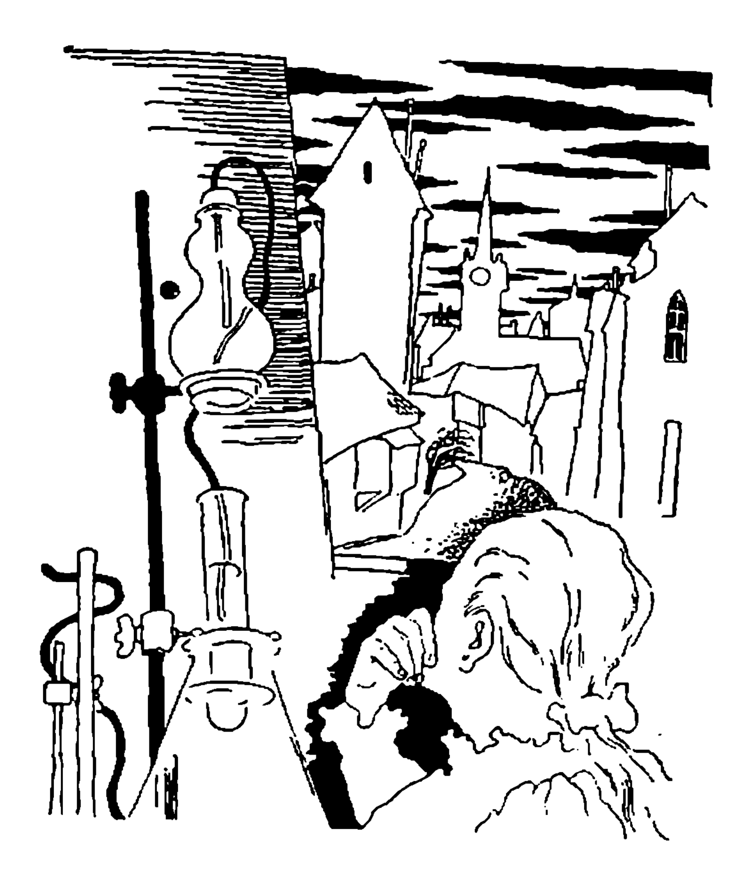
Resultó que Fermat había leído un libro de óptica escrito por su amigo de la Chambre. El autor deducía aquí leyes de la refracción de la luz, siguiendo las afirmaciones olvidadas hacía mucho tiempo de Herón, quien vivió más de cien años antes de nuestra era. Herón partía del principio metafísico, según el cual la naturaleza siempre actúa por la vía más corta. En el cuarto postulado, que trata de las propiedades de los espejos, Herón señalaba que de todos los rayos que experimentan la reflexión y que unen dos puntos, serán los mínimos aquellos que se reverberan bajo ángulos iguales. Al ser mínimos, son los más cortos.

Lo malo era que en una serie de casos la luz, al reflejarse de los espejos cóncavos, iba por la vía más larga. ¿Qué hacer entonces con el principio de Herón, tan apreciado por los amantes de principios generales?

Fermat afirmaba que la longitud del recorrido

no es tan importante como la sencillez. Una recta es más simple que una curva. Si no examinamos todo el espejo cóncavo, sino una recta que le es tangente en el punto de incidencia de la luz, estará todo claro. Con relación a la recta, el recorrido de la luz es el más corto. Así es cómo podemos reconciliar el cuarto postulado de Herón con el principio general de la simplicidad. Basándose en este principio, Fermat halló inmediatamente la ley de la refracción. Mas, igual que en el caso del gran teorema, nadie pudo comprender de qué modo lo había hecho. Fermat le prometió a de la Chambre que le presentaría la demostración tan pronto como éste lo exigiera; no obstante, tardó cuatro años en cumplir la promesa. Descartes prestó atención al hecho de que Fermat era gascón. Y, efectivamente, sólo el 1 de enero de 1662 Fermat demostró que los gascones son también capaces de cumplir sus promesas. En la carta que había escrito a de la Chambre felicitándole con el Año Nuevo, Fermat precisaba que la naturaleza no sólo tiende a marchar por el camino más corto, ¡sino que por el camino posible de recorrer en el plazo más corto! La ley de la refracción se obtuvo con una naturalidad sorprendente. Pero, lamentablemente, Descartes había fallecido y no pudo apreciar el donaire del gascón.

Hamilton se planteó el objetivo de deducir todas las leyes de la óptica partiendo de un solo principio. Quería imitar a Lagrange, quien compuso toda la mecánica analítica partiendo del principio de mínima acción. Hamilton comprendía que este principio, igual que el principio de Fermat, se deducía de las consideraciones metafísicas acerca de la economía en la naturaleza. Pero, después de precisar más aún la formula-



ción de Fermat, él habla de las acciones extrema, estacionaria o variante.

Hamilton logró reducir la formulación matemática de este principio a dos ecuaciones matemáticas. De las ecuaciones, como simples corolarios, se obtuvieron todas las leyes de la óptica y la mecánica. En ellas no había éter ni corpúsculos, y daban todo aquello, y solamente aquello,

que podía someterse a la comprobación experimental.

Posiblemente sea necesario señalar aquí que el método de Hamilton es, precisamente, la base de toda la mecánica cuántica. La ciencia revela de la manera más clara los vínculos que existen entre las generaciones. Las ideas científicas no reconocen fronteras. Pero se equivoca enormemente aquel que intenta comparar el fomento de la ciencia con la corriente constante e ininterrumpida de un río caudaloso. El progreso de la ciencia se parece a la caprichosa corriente de un riachuelo montañoso que se dispersa en muchísimos brazos, que se detiene en las ensenadas y que vuelve a correr por los rápidos bancos.

Un talento innato

A comienzos del siglo pasado, un muchacho de trece años, hijo de un herrero londinense, ingresó de aprendiz en un taller de encuadernamiento después de efectuar cortos estudios en la escuela primaria. Allí podía leer cuanto deseara.

¿Valdría la pena ponerse a adivinar cuál sería su destino y la historia de la ciencia si el muchacho hubiese estudiado otro oficio?

Miguel Faraday no sólo leía, sino que reunía conocimientos. Comenzó a frecuentar las conferencias públicas. Sobre todo las del eminente químico Davy. Las conferencias cautivaron al joven de tal modo que decidió enviarle una carta rogándole que le admitiese al trabajo. Así es cómo Faraday se abrió camino a la ciencia.

Como es natural, Faraday aprendió química trabajando con Davy. Mas al muchacho le atraía la física. La ausencia de conocimientos sistemáticos de las matemáticas dejó huellas caracte-

rísticas en todas las investigaciones de Faraday. Era un experimentador audaz y genial. Algunos limitan su papel precisamente con los grandes descubrimientos experimentales. Mas Faraday era además, sin duda alguna, un gran profeta. El aspiraba y sabía hallar lo común que había en aquellas ramas de la ciencia, que parecían estar alejadísimas unas de otras, así como en los fenómenos totalmente desemejantes. Era un gran teórico, capaz de penetrar con su mirada mental en la misma médula de los objetos y de los fenómenos; sabía formular sus ideas de forma tan precisa, que incluso su expresión verbal no se quedaba atrás de los teoremas matemáticos. He aquí lo que escribía Maxwell al respecto: "A medida que yo avanzaba en el estudio de los trabajos de Faraday, iba convenciéndome de que su modo de comprender los fenómenos tenía también carácter matemático, aunque él no nos los presentara con la vestimenta universalmente admitida de las fórmulas matemáticas..."

Faraday llegó a la honda conclusión sobre la unidad de la naturaleza y se esforzaba por hallar nuevas y nuevas demostraciones de esta unidad.

"... Ahora sabemos — señalaba Faraday — que él (el magnetismo) actúa sobre todos los cuerpos y se encuentra en la más estrecha relación con la electricidad, el calor, los procesos químicos, la luz, la cristalización y, a través de la última, con las fuerzas cohesivas".

Faraday realizó gran cantidad de experimentos, en los que se manifestaba la unidad de lo que él denominaba fuerzas y que en la terminología contemporánea se conocen como distintas formas de energía. No obstante, el descubrimiento capital de Faraday, el más importante

después de Newton, fue su conclusión teórica acerca de la existencia de campos. El identificaba a los campos con la materia, opinando que ésta penetra a través de los cuerpos y llena todo el espacio.

El espacio de Newton es un recipiente pasivo de cuerpos y cargas. El espacio de Faraday es una concentración de fenómenos, una fuente y un transmisor de fuerzas que actúan sobre los cuerpos y las cargas.

¡Atención! Llegamos a la conclusión más importante para toda la historia del estudio y el dominio de la luz. Un espacio relleno de líneas de fuerza hace innecesaria la noción del éter. ¡Innecesaria! Podemos imaginarnos que la luz no es más que la vibración de las líneas de fuerza.

Faraday señalaba: "Si admitiésemos esta posibilidad, podríamos pasar sin el éter..."

El Intéprete creador

Maxwell se planteó la tarea de dar forma matemática a las ideas de Faraday. Maxwell se entusiasmó por las matemáticas a una edad muy temprana. Su primer trabajo científico lo terminó un año antes de ingresar en la universidad, cuando tenía quince años de edad. El don matemático de Maxwell se reveló cuando solucionó un problema que parecía completamente inaccesible para los habitantes de la Tierra. Se trata del enigma de los anillos de Saturno, descubiertos, como ya sabemos, por Huygens. Durante varios siglos transcurridos desde entonces se han expresado muchísimas hipótesis respecto a la naturaleza de dichos anillos. Pero nadie podía proponer un método para comprobar su

autenticidad. Y lo que hasta entonces quedaba siendo impracticable para el oxporimento, se solucionó en una hoja de papel. Por medio de un cálculo. Maxwell demostró quo los anillos no son formaciones continuas (sólidas o líquidas), sino que deberán estar compuestos por numerosos cuerpos sueltos, pero que giran por órbitas cercanas. También para la ciencia tienen gran importancia los trabajos de Maxwell relacionados con la teoría cinética de los gases, mas los resultados más valiosos él los obtuvo desarrollando las ideas do Faraday.

Desde 1860 hasta 1875, después de una prolongada y minuciosa labor Maxwell creó una teoría, de acuerdo con la cual las fuerzas eléctricas y magnéticas de la naturaleza están unidas en el concopto de campo electromagnético único, que incluye la luz visible y los rayos invisiblos ultravioletas e infrarrojos.

Todo lo que se conocía en cuanto a la electricidad y el magnetismo, él lo unificó en cuatro ecuaciones extraordinariamente soncillas. Estas ecuaciones son, precisamente, las que comunicaron que la luz son ondas electromagnéticas, capaces de propagarse en el vacío con la misma facilidad que en los cuerpos transparentes. Además, do las ecuaciones se deducía quo estas ondas electromagnéticas pueden existir de por sí solas. Ellas representan una realidad quo antes desconocía el hombre y que apareció súbitamente ante los sabios igual que aparece una vigorosa cordillera al dispersarse la niebla.

Según estima uno de los grandes físicos de nuestros tiempos, incluso "las nociones modernas no pueden servir de base para comprendor estas oscilaciones electromagnéticas, las cuales no so reducen a la idea clásica y evidente sobre

las oscilaciones de un cuerpo material; suspensas en el vacío, si podemos decirlo así, parecen para los profanos (posiblemente para los físicos también) que tienen un aspecto bastante misterioso".

¡Qué podría exigirse, pues, de los contemporáneos de Maxwell! El éter pese a sus propiedades extraordinarias, se había afirmado sólidamente en sus corazones, pues quienes habían formado su concepción del mundo bajo la influencia de la física newtoniana, cuyo ideal era reducir todos los fenómenos a los mecánicos, no podían renunciar del éter como portador de las ondas luminosas. No se atrevían a creer en la esencia independiente de la luz y de otras ondas electromagnéticas que se desconocían aún.

La teoría de Maxwell era en la ciencia la primera etapa de la física no mecánica, el primer piso de la grandiosa pirámide de abstracciones que se complicaban cada vez más. Nosotros veremos que las dificultades, relacionadas con la asimilación de nuevas abstracciones, surgirán de nuevo, cuando llegue la era de la teoría de la relatividad y la de la mecánica cuántica.

Las ecuaciones de Maxwell no sólo contenían en sí la descripción de los fenómenos conocidos, sino también la predicción de nuevos, que fueron descubiertos más tarde, incluyendo la predicción de la existencia de la inducción eléctrica y de las ondas radioeléctricas. Estas ecuaciones lo único que no contenían era el éter luminoso y sus asombrosas propiedades. El éter quedó simplemente al margen de la teoría de Maxwell, pero esto no le impidió de modo alguno ayudar con seguridad al desarrollo de la ciencia. Para ciertos científicos, el éter pasó a ser solamente el sinónimo de vacío.

Sin embargo, a pesar de que Hertz descubrió experimentalmente al cabo de doce años que en sus aparatos se excitaban las ondas electromagnéticas predichas en la teoría de Maxwell, las tradiciones de la física mecanicista no habían sido quebrantadas. Muchos físicos seguían empeñados en poner a la teoría de Maxwell los zancos de la acostumbrada evidencia. Unos estimaban que los campos electromagnéticos de Maxwell eran tensiones especiales de éter, lo mismo que antes opinaban que la luz eran ondas transversales en el éter.

Otros, que continuaban considerando al éter como una realidad, preferían olvidarse de sus propiedades contradictorias, situándolo en la categoría de sustancias imponderables e incognoscibles.

El pájaro de fuego

El siglo pasado llegó a su segunda mitad bajo los acordes solemnes de las trompetas. El edificio de la ciencia resplandecía con muchas torres y parecía que estaba construido para sécula seculorum.

Cuentan que un joven, quien soñaba con dedicarse a la física teórica, le confió su secreto a Thomson. Este comenzó a desaconsejar al joven físico, diciéndole que la física teórica ya estaba terminada en lo esencial y que no había nada que hacer en ella.

Pero Thomson se equivocaba, igual que muchos se habían equivocado antes y después de él, cuando opinaban que habían alcanzado los límites del saber, sin haber comprendido que la naturaleza es inagotable e ilimitado el proceso del conocimiento.

La ciencia atrae a sus servidores con la apariencia encantadora de las cumbres resplandecientes, y éstos trepan, sin sentir cansancio, por las sendas pedregosas, deseando llegar a lo alto y menospreciando los espantosos precipicios. Ocurre también así: el hombre construye una torre para poder ver mejor y más lejos. Otras personas le ayudan con impaciencia, mientras que al pie de la torre aparece un abismo que amenaza con tragar a los constructores y a la orgullosa torre en caso de que no se logre consolidar los cimientos a su debido tiempo...

Kirchhoff, eminente físico alemán, quien habíase enaltecido por haber enunciado las leyes de propagación de la corriente eléctrica en una red, leyes que en nada se diferenciaban de las que dirigen el fluido de líquidos por los tubos, estudiaba con tesón las propiedades de los cuerpos elásticos, que en aquel entonces no estaban muy claras. El destino quiso que Kirchhoff tropezase con el magnífico químico Bunsen, ya famoso por haber inventado la pila galvánica de carbón y zinc y por haber obtenido magnesio, litio, calcio y estroncio metálicos con ayuda de esta pila.

Bunsen perdió un ojo durante una explosión que sucedió cuando estaba efectuando uno de sus experimentos y se intoxicó gravemente con arsénico, mas esto no le impidió seguir siendo optimista y ver lo mucho que se encontraba oculto para otros. El abrió camino a la química de los compuestos organometálicos y a la química de los radicales, trataba de crear el método del análisis químico que sirviese para controlar los procesos metalúrgicos. El principal requerimiento aquí era la rapidez, propiedad casi inaccesible en la química.

Así, pues, ellos se encontraron y empezaron a trabajar juntos con ardor. Estudiaron el espectro de la llama coloreada con sales de distintos metales, utilizando para esto el espectroscopio y el mechero de gas, inventado especialmente por Bunsen. Este mechero, que existe todavía, da una llama casi incolora. Sus descendientes funcionan hoy día en las cocinas de gas y en los hogares de los grandes hornos.

Después de Newton, tanto en los laboratorios como en los salones aristocráticos, se entretenían con la descomposición de la luz blanca en rayas irisadas. Mas, únicamente a principios del siglo XIX, logró Wollaston unir el prisma con una estrecha rendija en la cámara obscura. Así es cómo surgió el espectroscopio, en el que se obtuvo un espectro extraordinariamente brillante, parecido a la cola del pájaro de fuego. Los colores eran vivos, no tenían el velo blanquecino que tanto molestaba a los antecesores de Wollaston. En el fondo del espectro irisado, Wollaston divisó siete líneas oscuras. Pensó que eran los límites que dividían los colores del espectro, y no les dio importancia alguna. Era un hecho sin importancia, que él creyó muy natural.

¿Podría haber en aquellos tiempos algo más habitual que las fronteras, cuando existían pequeños principados y Estados hostiles?

No es de extrañar que enseguida se olvidaran de este descubrimiento. Fue uno de los muchos casos tristes en la historia de la ciencia.

Intentando aumentar el brillo de la imagen mientras observaba los espectros, Fraunhofer unió el anteojo con el espectroscopio de rendija de Wollaston y dirigió los rayos solares a su aparato. Resultaba que a este magnífico y bri-

llanto ospoctro lo atravesaban centenaros de rayas muy precisas y oscuras... Había muchísimas...

Los ospectroscopios do Fraunhofer conquistaron gran popularidad. Eran muchos los que admiraban la encantadora sinfonía de la luz. Pero "mirar" no significa "ver". Por su sentido, "ver" se aproxima mucho más a "comprender". Eso os, procisamente, lo que tiene en cuenta el inglés al preguntar: "You soe?"

Nadlo puede decir cuántas porsonas, comenzando por Newton, examinaron espectros de todo género. Sin duda alguna, muchos habían notado quo el color de la llama está relacionado con la aparición de brillantes rayas estrechas en su ospectro. Quizá alguien hubiese notado que las rayas amarillas, originadas por la sal común, surgían también al introducir en la llama otras sales do sodio. Las rayas verdes aparecían no sólo en presencia do cobre metálico, sino al calentar también poqueñísimos gránulos de caparrosa azul y de otras sales de cobro.

Kirchhoff y Bunsen, después de efectuar prolongados exporimentos y do mucho meditarlos, llegaron a la firme conclusión de que Talbot tenía razón al decir: "Cuando en el espectro de la llama aparecen determinadas rayas, éstas caracterizan ol metal que contiene la llama". Es más, cada elemento químico se caracteriza totalmente por el conjunto de rayas espectrales, que son un pasaporte peculiar del elemento químico. Observándolas en ol espectroscopio, podemos juzgar acerca de la existencia de dado elemento en una sustancia.

Así apareció el análisis espectral.

Al poco tiempo de comenzar el trabajo conjunto, Bunsen y Kirchhoff descubrieron dos nuevos elementos, a los que dieron los nombres

de cesio (del latín caesius, azul) y de rubidio (encarnado), conforme al color de las rayas espectrales que eran características para estos elementos. El descubrimiento demostró de forma convincente el alcance del nuevo método, y más tarde muchos hombres de ciencia comenzaron a desarrollar y utilizar el análisis espectral.

Se descubrieron, uno tras otro, el talio, el indio y el galio. Este último lo había predicho D. I. Mendeléiev basándose en su sistema periódico de los elementos.

En el espectro del Sol se descubrieron rayas que no coincidían con ningunas de las que se conocían en la Tierra. Así es cómo el hombre se enteró de la existencia del helio, elemento que poco más tarde fue hallado en nuestro planeta. Esto fue un triunfo. Pero, tal vez, tuviera una importancia científica y filosófica mucho mayor la conclusión, que cada vez recobraba más fuerzas, acerca de la unidad del mundo que se manifestaba en que todo el universo se componía de los mismos elementos.

En 1888, Helmholtz escribía que el descubrimiento del análisis espectral produjo admiración en los hombres, despertando su fantasía más que cualquier otro descubrimiento, puesto que éste proporcionaba la posibilidad de echar una ojeada a ese mundo que nos parecía tan inaccesible.

Poco a poco se supo que la posición de las rayas espectrales no era caótica, sino que se subordinaban a unas regularidades determinadas. Sabido era que las regularidades guardan relación con algunos rasgos específicos de los propios elementos. Se logró agrupar en series muchas rayas espectrales que estaban subordinadas a leyes matemáticas muy simples. También se ob-

tuvieron coeficientes numéricos simples que componían fórmulas para varias series diferentes, incluyendo aquellas que pertenecían a los distintos elementos. Mas ¿qué significaba este orden? ¿A razón de qué existía? Parecía que la naturaleza estaba lanzando un reto a los científicos. ¿Cómo Thomson pudo menospreciarlo?

La catástrofe ultravioleta

Este no era el único enigma con que la naturaleza inquietaba las mentes de quienes se sentían incansables aún ante sus sorpresas. Aquí no tenemos más remedio que dejar a un lado todo aquello que no esté relacionado con la luz, pero aún teniendo relación directa con ella, por insuficiencia de espacio nos vemos obligados a detenernos solamente en lo más interesante.

Uno de esos enigmas se remonta a Kirchhoff. La explicación de la naturaleza de las rayas de Fraunhofer condujo a que Kirchhoff formulara una ley general, cuya esencia es tan simple como lo son también otras grandes leyes de la naturaleza: el poder emitivo de un cuerpo es proporcional al poder absorbente del mismo y depende de la temperatura. La termodinámica, que para aquel tiempo había alcanzado grandes éxitos, afirmaba que todos los cuerpos situados dentro de una envoltura cerrada deben llegar al equilibrio térmico, es decir, alcanzar una misma temperatura. Aquí no importan las dimensiones, las formas de los cuerpos o de la propia envoltura, así como tampoco importa de qué materia están compuestos. Tampoco es necesario el contacto entre ellos. El equilibrio será asegurado mediante la radiación que ellos emiten y absorben.

¿Qué ocurre si hacemos un orificio en la envoltura, donde ya existe el equilibrio térmico? Esta es una de las preguntas simples, para las que no hay respuesta simple. Pero si la envoltura se encuentra dentro de otra envoltura cerrada, la situación se simplifica. Ellas comienzan a intercambiar energía y su temperatura va equilibrándose poco a poco. En el transcurso de este intercambio, a través del orificio de la envoltura menor pasa la radiación que traslada el exceso de energía de la parte más caliente a la más fría. En caso de que la envoltura exterior esté más caliente, el flujo de energía estará dirigido hacia la cavidad interior de la envoltura menor, la cual absorbe toda la radiación, igual que lo hace un cuerpo negro.

Así es cómo Kirchhoff llegó a la noción del "cuerpo negro" y construyó su modelo en forma de una cámara con un agujero muy pequeño. La energía que sale de este agujero al exterior es determinada solamente por la temperatura del "cuerpo negro", pero no depende de la sustancia de que este modelo está hecho. Si calentamos el modelo hasta una temperatura alta, el agujero empieza a brillar con una deslumbrante luz blanca. Esto no es un juego de palabras, sino la consecuencia directa de la ley de Kirchhoff. El "cuerpo negro" incandescente debe ponerse en equilibrio con los cuerpos más fríos que le rodean, y para esto necesita entregar a los cuerpos exteriores, mediante la radiación, su exceso de energía. Cuando el cuerpo está muy caliente, la radiación es muy brillante.

Las asombrosas propiedades del "cuerpo negro" despertaron el interés de muchísimos investigadores. Después de generalizar los resultados de otros científicos y los suyos propios, el físico

austríaco Stefan demostró que la energía emitida por el "cuerpo negro" es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Pero ésta no es la temperatura registrada por la escala de Celsio, sino por la de Kelvin, cuyo cero no corresponde a la temperatura de fusión del hielo, sino a la baja e inaccesible temperatura, a la cual cesa (según la opinión de Kelvin) todo movimiento térmico. Boltzmann, uno de los mayores físicos del siglo pasado y compatriota de Stefan, demostró al poco tiempo, aunque en una forma puramente teórica, que la ley de Stefan podía obtenerse sin experimentos especiales, como un simple corolario de las leyes de la termodinámica.

La ley de Stefan — Boltzmann, como la llaman ahora, resultó ser válida en todo el diapasón de temperaturas accesible para nosotros y se consideraba como uno de los mayores logros de la física, aunque... no estaba muy claro qué papel jugaba aquí el transportador de la radiación, el éter.

Pasaron diez años más y el gran analítico Wien coronó los intentos del físico ruso V. A. Mijelsón de determinar la distribución de la energía en el espectro del "cuerpo negro". Partiendo única y exclusivamente de los experimentos mentales y desarrollando las ideas de Boltzmann, Wien demostró que el segundo principio de la termodinámica requiere que la intensidad espectral de radiación del "cuerpo negro" se exprese mediante una función, desconocida para él, del producto de la longitud de onda luminosa por la temperatura del "cuerpo negro"; además, el factor que está delante de esta función tiene que ser la quinta potencia de su temperatura.

Lo que requiere el segundo principio de la termodinámica era sagrado para los físicos del siglo pasado y continuará siendo una verdad por los siglos de los siglos. A los hombres no les queda más que procurar comprender el por qué sucede así. Resulta que de la ley obtenida por Wien mediante simples operaciones matemáticas, se deduce otra ley, a la que Wien denominó ley de desplazamiento: el valor máximo de la curva, que representa el espectro de radiación del "cuerpo negro", se desplaza en dependencia de la temperatura del cuerpo. El desplazamiento se efectúa de tal forma que queda constante el producto de la temperatura absoluta del "cuerpo negro" por la longitud de la onda correspondiente al máximo de radiación. Esta ley, obtenida sobre la base de los principios de la termodinámica, se observa en todos los casos que conocemos. Ella nos permite determinar la temperatura de los cuerpos sin falta de termómetro, sólo con ayuda del espectroscopio. Así pudo resolverse el problema que parecía insoluble: el de determinar la temperatura del Sol y las estrellas.

Wien intentó dar un paso más: determinar el aspecto matemático de la función que forma parte de la ley de radiación del "cuerpo negro". La fórmula que él obtuvo requería que la intensidad de radiación en cada longitud de onda se inclinase hacia el límite al elevarse la temperatura. El experimento refutó esa conclusión. La fórmula de Wien coincidía con el experimento sólo cuando las longitudes de las ondas eran pequeñas y bajas las temperaturas. Cuando las temperaturas eran altas y grandes las longitudes de ondas, esta fórmula contradecía bruscamente al experimento.

A este problema se dedicó el famoso Ray-

leigh, quien llevaba hasta el año de 1873 el apellido de su padre Strutt y después, por sus méritos científicos, le fueron concedidos los títulos de noble y de lord Rayleigh. El advirtió con certeza que las dificultades en cuanto a la determinación de la forma de esa función incógnita de Wien se deben a que el éter quedaba al margen. Rayleigh aplicó al sistema, compuesto de sustancia y éter, una irreprochable ley clásica establecida por Maxwell y Boltzmann. Conforme a esta ley, la energía en cualquier sistema físico se distribuye uniformemente entre todos los grados de libertad del sistema. El éter se consideraba un medio continuo. Por tanto, poseía un número infinito de grados de libertad y había que tenerlo en cuenta. Rayleigh obtuvo una fórmula muy sencilla: la densidad espectral de radiación del "cuerpo negro" debe ser proporcional a su temperatura e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda, en que se efectúa la medición.

El eminente físico nunca había sufrido una desilusión tan grande en su vida. La fórmula obtenida no coincidía con el resultado del experimento. En vez de la curva en forma de campana, cuya cúspide se determinaba por la ley de desplazamiento de Wien, la fórmula de Rayleigh, aun coincidiendo con el experimento en el declive de la onda larga de la curva, exigía un incremento infinito de energía a medida que se acortaba la longitud de onda, ¡pues el cuadrado de la longitud de onda figuraba en el denominador! Esta conclusión entró en la historia de la ciencia como la "catástrofe ultravioleta".

No obstante, ésta no era la única conclusión absurda que se deducía de la fórmula de Rayleigh, pues, si bien una porción concreta de mate-

ria contiene un número finito de grados de libertad, el número de grados do libertad del éter es infinito en cualquier volumen. Por consiguiente, on concordancia con la fórmula de Rayleigh toda la energía debe pasar al éter, mientras que la materia debe enfriarse hasta el coro absoluto. Y lo poor de todo era que la fórmula de Rayleigh no era culpablo, sino que ésta puso de manifiesto aquollo que había quodado oculto en las propias bases de la física clásica. Además, Lorentz demostró que incluso una simple proporcionalidad de la intensidad de emisión a la temperatura absoluta debe conducir al absurdo.

Así fue cómo los fundadores dol majestuoso odificio de la física clásica descubrieron arenas movedizas debajo de sus cimientos. El siglo XIX finalizaba trágicamente, se encontraba en un atolladero científico del que no había salida. Todo parecía irreprochable: tanto los principios básicos, comprobados por la experiencia multisecular, como las transformaciones matemáticas basadas en axiomas inmutables. Hasta ol momento éstos siempre conducían a prediccionos que eran confirmadas por los oxperimontos. En los casos de divergencias, siempre se descubrían orrores del experimento, do los cálculos o do las hipótesis complementarias que no tenían relación alguna con los fundamentos de la ciencia.

Aquí, sin embargo, ocurría de otro modo. El defecto yacía en los mismos principios. Pero se desconocía en qué consistía y cómo eliminarlo.

Se aproximaba el siglo siguionte.

CAPITULO II

LOS PRECURSORES

Los fantasmas

El siglo XIX no había pasado en vano. Sus resultados fueron enormes. La soberbia aguja de la Torre de Eiffel, de trescientos metros de altura, no sólo simboliza los logros de la técnica del siglo. Ella, en el sentido directo de la palabra, está apoyada en la mecánica y la teoría de la elasticidad, las matemáticas y el análisis espectral, que permitieron calcular la estructura de la torre y fundir el acero para su construcción. La técnica es el fruto de la ciencia; aquélla no nace de la inspiración del poeta.

La frontera del siglo es imposible descubrirla entre los anillos anuales de las secoyas milenarias o en las capas estratificadas de tierra. Tampoco está señalada en el cosmos, en la espiral infinita que describe nuestra Tierra al desplazarse con el Sol por su enorme órbita alrededor del centro de la Galaxia. ¿Y a dónde corre tanto la propia Galaxia? A nosotros, seres tan insignificantes en el fondo de esa grandeza, nos gusta crear motivos para festejos. Aunque no sea más que para embellecer la monotonía de la vida prosaica. El día de nacimiento de Cristo se determinó como el principio de los siglos, aunque ese día no sea muy fidedigno; se elaboró el sistema decimal...

En una palabra, nuestra historia se aproximó a los límites del siglo XX.

Así, pues, ¿qué aporte esencial trajo el siglo XIX a la teoría de la luz, que es lo que nos interesa en este momento? En primer lugar, el

principio de la conservación y transformación de la energía, principio previsto intuitivamente ya por el gran Lomonósov, y que fue el comienzo de la termodinámica. Después, la teoría electromagnética de Maxwell, teoría que incluyó en sí la óptica ondulatoria de Fresnel y que engendró la teoría electrónica de Lorentz.

¡No era tan poca cosa para un siglo! Este no pasó en vano. Hubo también logros menos importantes, pero que eran dignos de permanecer eternamente en la categoría de los mejores descubrimientos del siglo. Nunca perderá su importancia el método de variación de Hamilton; siempre tendrán aplicación el análisis espectral y las ondas radioeléctricas...

Los científicos celebraban con prosperidad y victorias la aproximación del nuevo siglo, pero les quedaba el fantasma del éter, que amenazaba con abrir un abismo infranqueable entre la mecánica y la electrodinámica. Quedaba por delante el fantasma de "la catástrofe ultravioleta", fenómeno que contraponía la electrodinámica a la termodinámica. El electrón recién nacido parecía que era ajeno a la demás materia. Además, la sustancia habitual emitía señales incomprensibles, cifradas en las brillantes rayas del espectro que les decían a los hombres de ciencia una sola cosa: ¡Ustedes no saben casi nada!

Los cuantos

Guillermo Wien, autor de la ley del desplazamiento, a la que se le dio su nombre, y Max Planck, profesor berlinés, quien para entonces había conquistado popularidad con los trabajos de termodinámica, hallaron el método de librar a la física del fantasma de "la catástrofe ultra-

violeta". Mejor dicho, haciendo un solitario matemático, descubrieron que había esperanzas de salir del apuro. Expusieron la hipótisis de que la intensidad de radiación del "cuerpo negro" no aumenta, como en la fórmula de Rayleigh, sino que disminuye con la longitud de onda. Incluso dieron con una determinada regularidad en esta disminución. Mas, ni la propia hipótesis ni el aspecto exponencial de la regularidad no se deducían de nada, a no ser de la necesidad de coordinar las propiedades de la radiación con el hecho de la existencia del mundo que no estaba enfriado hasta el cero absoluto, a pesar de la fatídica ley de Wien.

En 1899, un experimento confirmó la nueva ley de Wien y Planck y parecía que una de las quimeras desaparecería junto con el siglo agonizante. Pero las mediciones más precisas de Lumiere y Pringsheim condujeron a grandes desviaciones de la ley de Wien y Planck. Hubo que comenzar todo de nuevo y Planck renovó la labor.

Los cálculos de Planck confirmaron una conclusión espantosa: al mundo lo esperaba la muerte ultravioleta. Mas los físicos no hallaban en la vida circundante el menor síntoma de este fin tan triste. Ellos tenían que salvar también a la teoría de este absurdo error. Esta cuestión preocupaba no sólo a Planck. Eran muchos los hombres de ciencia que no deseaban reconciliarse con la flojedad de las fórmulas que ellos mismos habían deducido.

Mas al primero que le tocó la suerte fue al que mejor estaba preparado. Aquí se trataba de la reconciliación de la termodinámica y la electrodinámica, de la relación que existía entre la energía y la frecuencia de emisión. A la ley

de distribución de Wien le correspondía una relación entre ellas; la fórmula de Rayleigh daba otra. Desde esta incoherencia se reía la muerte ultravioleta.

El 19 de octubre de 1900, Planck comunicó a la Sociedad Física Alemana que había hallado una fórmula que vinculaba, al parecer, los enunciados incompatibles de Wien y Rayleigh. La nueva fórmula daba una salida formal de la situación dramática, pero, igual que la fórmula anterior de Wien y Planck, no tenía fundamentos en la termodinámica ni en la electrodinámica.

No en vano hasta hoy día se pronuncia con veneración el nombre de Planck, pues este científico libró definitivamente a la física de "la catástrofe ultravioleta".

Más tarde, Planck señalaba en el informe pronunciado al recibir el Premio Nobel: "Después de haber estado realizando durante varias semanas el trabajo más intenso de mi vida, un rayo iluminó las tinieblas en las que me revolcaba y aparecieron ante mí inesperadas perspectivas".

El rayo del que hablaba Planck iluminó toda la rama del saber relacionada con la naturaleza de la materia. Esto ocurrió en ese mismo año de 1900. Al examinar el proceso del intercambio de energía entre un cuerpo candente y el espacio circundante, Planck suponía que este intercambio no se realizaba de una manera continua, sino en forma de pequeñas porciones. Después de describir matemáticamente este proceso, dedujo una fórmula cuya coincidencia era exacta con la distribución de la energía en el espectro del Sol y de otros cuerpos candentes. Así entró en la ciencia la noción de la porción mínima de energía: el cuanto.

El cuanto, desde su nacimiento, resultó ser un niño caprichoso. En el cálculo fue introducido por Planck en calidad de cuanto de energía; luego apareció en la fórmula definitiva en forma de cuanto de acción: magnitud que es el producto de la energía por el tiempo. La causa de esta transformación todavía no estaba clara. Poco a poco, Planck, y tras él otros científicos, iban reconciliándose con el carácter discreto de la energía, pero la discontinuidad de la acción mecánica siguió siendo inconcebible durante mucho tiempo.

Fue Einstein quien resolvió ese enigma, llegando a la conclusión de que la teoría cuántica de Planck, creada sólo para explicar el intercambio de la energía térmica entre un campo electromagnético y la materia, debe ser sustancialmente ampliada. Einstein estableció que la energía de un campo electromagnético, incluyendo también las ondas de luz, existe siempre en forma de porciones determinadas: cuantos.

Así es cómo Einstein sacó al cuanto de su cuna y demostró al mundo las asombrosas posibilidades que éste poseía. La idea acerca del cuanto de luz (fotón), como una realidad objetiva que existe en el espacio entre la fuente y el receptor, pero no como una magnitud formal que aparece solamente al describir el proceso del intercambio de energía, le dio la posibilidad para crear una teoría lógica del efecto fotoeléctrico y otros fenómenos enigmáticos que durante mucho tiempo estuvieron martirizando a los científicos. Esto apuntaló también los cimientos de la fórmula de Planck, que en aquellos tiempos estaba bastante inestable. Después de que Einstein admitió de manera decidida que la energía electromagnética existía siempre en forma de

cuantos, era difícil suponer ya que ésta interacciona con la materia no por medio de cuantos, sino de una manera continua, como pensaban antes de Planck.

La teoría cuántica de la luz, que había superado con éxito el enigma del efecto fotoeléctrico, no era, ni mucho menos omnipotente. Por el contrario, era totalmente incapaz en los intentos de describir una serie de fenómenos notorios, como son, por ejemplo, el surgimiento de colores brillantes en las capas finas de petróleo derramado en el agua o la existencia de un aumento máximo en el microscopio y el telescopio. Mientras tanto, la teoría ondulatoria de la luz, impotente en el caso del efecto fotoeléctrico, respondía fácilmente a estas preguntas. Esto produjo incomprensiones y una desconfianza duradera en lo que se refería a la teoría cuántica de la luz. Tampoco la aceptó Planck, el padre de los cuantos.

Era tan grande la desconfianza que Planck sentía hacia la teoría de los fotones, que le incitó incluso a renunciar de su propia teoría de los cuantos. El confiaba en que mediante un compromiso sería posible reconciliar su tendencia a las tradiciones clásicas y las exigencias persistentes del experimento. Le parecía que era posible salvarlo todo si aceptamos que la luz se propagaba y absorbía de acuerdo con las leyes ondulatorias clásicas, mientras que la discontinuidad es una propiedad de la materia y la cuantificación de la energía surge solamente en el proceso de la emisión de luz por la materia. Planck expuso su punto de vista en el informe al congreso de Solvay, celebrado en 1911.

Einstein no dio gran importancia a esta contradicción. Por el contrario, la consideraba na-

tural, pues reflejaba el carácter complejo, polifacético (diríamos, dialéctico) de la naturaleza de la luz. Opinaba que con esto se manifestaba la verdadera esencia dual de la luz, y que la constante de Planck jugaba un papel primordial en la unificación del cuadro ondulatorio y cuántico plasmando la alianza de las ondas y las partículas.

El nexo entre la frecuencia de la luz y la energía de los fotones, cuya existencia había vaticinado o, mejor dicho descubierto, Einstein, no encajaba en las nociones inseparables de todo el árbol de la ciencia clásica.

No es de extrañar que los físicos pensadores intentasen comprender este nexo sobre una base causal. (Los físicos que no deseaban pensar, volvían simplemente la espalda a esta sediciosa teoría de los fotones.)

He aquí uno de esos intentos que al cabo de medio siglo fue recordado en forma graciosa por su autor, el eminente físico, Max Born.

Imagínense varios manzanos con frutos, los cuales cuelgan de unos pedúnculos cuya longitud es inversamente proporcional al cuadrado de la altura sobre la tierra. Si sacudimos el árbol con una frecuencia determinada, las manzanas que cuelgan a una altura determinada empiezan a balancearse en resonancia y caen a tierra con una energía cinética proporcional a la altura de donde cayeron. Por consiguiente, esta energía es proporcional a la frecuencia, pues la frecuencia resonante, que hizo caer a la manzana, es proporcional a la altura, ya que esa frecuencia depende de la longitud del pedúnculo que hace el papel de un péndulo cuyo peso es la manzana.

Usted dirá que semejante razonamiento es ingenuo. En realidad parece ingenuo al cabo de

50 años, pero en aquellos tiempos el padre de los cuantos, Planck, lo repitió en una de sus conferencias.

Como veremos más adelante, el físico francés Luis de Broglie, aplicando las ideas de Einstein a las micropartículas, crea las bases de la mecánica ondulatoria, una de las piedras angulares de los cimientos de la física cuántica moderna.

La singularidad del genio de Einstein se revela al crear éste la teoría del efecto fotoeléctrico y la hipótesis de los cuantos de luz: en vez de introducir hipótesis particulares que responden a cuestiones concretas, da soluciones revolucionarias que aclaran simultáneamente la diversidad de los problemas complejos. Este rasgo se manifiesta en todo su esplendor en la obra principal de la vida de Einstein: la creación de la teoría de la relatividad, teoría que revolucionó la ciencia moderna.

Los átomos

Las misteriosas regularidades de las series espectrales iban convirtiéndose poco a poco en un gran peso no sólo para los especialistas en análisis espectral, sino también para los pensadores con tendencia a generalizar los cúmulos de hechos desordenados en una rigurosa construcción de la teoría.

He aquí estos hechos.

Año de 1870. Stoney presta atención a que las frecuencias de las tres líneas principales del espectro de hidrógeno se relacionan como números enteros, a saber, 20:27:32.

Año de 1871. Stoney y Reynolds establecen que las frecuencias de las rayas del espectro del cloruro de cromilo se encuentran en relaciones

simples con magnitudes totalmente inesperadas: con las frecuencias de las oscilaciones armónicas de la cuerda del violín.

Año de 1885. Balmer demuestra que los números obtenidos por Stoney era un caso particular de una ley más general, en cuya expresión entra una magnitud grande constante, el número 2, y una magnitud variable, que tiene valores de los números enteros 3, 4, 5, etc.

El trabajo de Balmer provocó resonancia en las mentes de los experimentadores. A los pocos años, Rydberg halló regularidades similares que unificaban las series de las rayas en el espectro del talio y en el del mercurio. Más tarde, Kayser y Runge fotografiaron los espectros con el propósito de simplificar el proceso de medición, y parecía que las regularidades incomprensibles salían del cuerno de la abundancia.

La primera década del siglo XX no mejoró la situación. Por el contrario, es posible que se hubiese embrollado más aún cuando Lyman encontró en 1904 una nueva serie de rayas espectrales de hidrógeno en la parte ultravioleta del espectro, invisible a simple vista; y Paschen descubrió en 1909 otra serie, igualmente invisible, en la parte infrarroja del espectro de hidrógeno.

Lo más asombroso era que estas nuevas series se describían con fórmulas que eran muy parecidas a la fórmula de Balmer; además, la magnitud constante grande que formaba parte de ellas, resultó ser exactamente igual. ¡No se observaban divergencias ni en una millonésima parte siquiera! Esto no podía ser una casualidad y esta magnitud se denomina ahora constante de Rydberg.

En 1908, al intentar aclarar el carácter de las regularidades espectrales, Ritz captó unas rela-

ciones extrañas entre los números que caracterizaban las frecuencias de las rayas espectrales. Resultaba que mediante una simple suma o resta de frecuencias de dos rayas cualesquiera podía obtenerse la frecuencia de la tercera raya. Así se hallaron nuevas rayas espectrales poco perceptibles, que antes eran desconocidas. Verdad es, que no todas las predicciones se confirmaron. Mas había esperanzas de que las rayas ausentes eran simplemente muy débiles y se lograra descubrirlas en el futuro.

Para muchos ya estaba claro en aquel tiempo que en las series espectrales se ocultaban los misterios recónditos de los átomos. Poincaré, tras examinar las regularidades espectrales que hacían recordar las leyes de oscilaciones de las cuerdas, membranas y tubos del órgano, y reconocer la impotencia de la ciencia ante estos hechos, escribía: "... creo, que aquí se concluye uno de los mayores secretos de la naturaleza". El pollo de la nueva ley picaba claramente, pero nadie podía ayudarle a salir del cascarón.

El enigma del átomo nos llegó de la profunda antigüedad, y el siglo XIX no hizo más que complicarlo, sin que se vislumbrase esperanza alguna de resolverlo.

Demócrito atribuyó a los átomos dos propiedades solamente: la magnitud y la forma. Epicuro añadió la tercera: el peso. Sin embargo, los siglos no pudieron confirmar o refutar las suposiciones de los sabios antiguos. Unas veces, los hombres de la ciencia se dejaban arrastrar por la idea de la divisibilidad de la materia, otras veces la menospreciaban.

A principios del siglo XIX, Ritter supuso que no sólo la materia, sino también la electricidad se compone de átomos. A mediados del

siglo, Weber señalaba que el movimiento del átomo de electricidad alrededor del núcleo material puede explicar los efectos ópticos y térmicos. En 1881, Stoney calculó la dimensión del átomo de electricidad. Es gracioso señalar que esta magnitud existió sin nombre durante diez años, hasta que su padre, Stoney, le dio el nombre de "electrón".

Años fértiles

¿Qué autor desconocido de la Biblia habrá inventado la alegoría de las siete vacas flacas y las otras siete gordas? Años de buena cosecha existen no sólo en el campo, sino también en los laboratorios. En 1895, Popov inventó la radio. En ese mismo tiempo, Perrin y Lippmann descubrieron la carga negativa en los rayos catódicos de Crookes y con esto dieron comienzo a la electrónica. (Muchos años después, nuestro relevante contemporáneo, el académico A. I. Berg unificó estos gemelos en una ciencia sintética, la radioelectrónica.) En el mismo año, Roentgen, cediendo al entusiasmo general, se dedicó también a la investigación de los rayos catódicos y descubrió los nuevos rayos X, que posteriormente adquirieron su nombre.

El siguiente año de 1896 fue también un año fértil. Henri Becquerel, nieto del famoso físico Antoine Becquerel, continuó las investigaciones de la fosforescencia en las sales de uranio, fenómeno misterioso que fue la gran pasión de su padre, Edmond Becquerel. Resulta que en la física existen también dinastías: el hijo de Henri Becquerel, Juán, ha sido también un eminente físico.

Mas volvamos a Henri Becquerel, quien estu-

dió la luminiscencia de las sales de uranilo, las cuales brillaban con viveza en la oscuridad, habiendo estado expuestas antes a la acción de los rayos del sol. El descubrió que la radiación invisible de las sales de uranio no tiene relación alguna con la iluminación previa.

Al enterarse de que los rayos X, recientemente descubiertos, provocaban fuga eléctrica de un cuerpo con carga, Becquerel decidió comprobar si era capaz de efectuar eso mismo la radiación descubierta por él. El experimento confirmó su hipótesis y ahora podía valerse de dos métodos: el fotográfico y el eléctrico. Pasaron dos años más, y los esposos Curie descubrieron que el torio posee las mismas propiedades que el uranio. Ellos introdujeron el término de "radiactividad" para designar la singular propiedad de las sustancias capaces de emitir "rayos de Becquerel". Cuando notaron que algunos minerales eran más radiactivos que el torio y el uranio, quisieron hallar la causa de esto y descubrieron el polonio, denominado así en honor a la patria de María Curie, y después hallaron el radio, el elemento más radiactivo de todos los conocidos en aquel tiempo. En la divisoria de nuestro siglo, Becquerel descubrió que sus rayos se desvían con un imán, y Rutherford, al que la humanidad conoció algo más tarde, determinó que estos rayos constan de dos partes. A una, la más absorbida por la materia, la denominó radiación alfa; a la otra, que era la menos absorbida, radiación beta.

Poco tiempo después, Willard descubrió una componente mucho más penetrante, a la que el imán no lo desviaba en absoluto, y la denominó radiación gamma.

Poco a poco fue estableciéndose que los rayos

alfa llevan carga positiva; los rayos beta, negativa, y los rayos gamma no llevan carga alguna, lo que hace recordar a los rayos de Roentgen. Se logró precisar un hecho sorprendente: las partículas de los rayos beta tenían distintas velocidades y la relación entre sus cargas y la masa variaba conforme a la velocidad de las partículas. Esto hacía recordar la vieja idea de Abraham, quien consideraba posible que la masa del electrón, aunque tan sólo fuese parcialmente, dependía del campo electromagnético. ¿Tal vez serían electrones los rayos beta y Abraham tuviera razón?

Los procesos radiactivos surgen en las profundidades de los átomos liberando al mismo tiempo calor. Pierre Curie y Laborde estudiaron el proceso y determinaron por medio de dos métodos que un gramo de radio despide a la hora 100 calorías de energía. ¿De dónde surge esa energía?

María Curie ya suponía que el calor se desprende de la sustancia radiactiva al emitir los rayos de Becquerel; además, que las sustancias radiactivas, en este caso, cambian muy lentamente. Pero semejante hipótesis contradecía todos los principios de la ciencia: el principio de conservación de la energía (¿de dónde surge esta energía?); el principio de conservación de la materia (¿cómo puede variar la sustancia radiactiva?) y la noción intuitiva multisecular sobre la inmutabilidad de los átomos.

María Curie, asustada de su propia osadía, expuso la segunda hipótesis: las sustancias radiactivas captan una radiación externa desconocida, que no está al alcance de nuestros aparatos, transformándola en calor y en energía de emisión radiactiva.

El tiempo ha demostrado que en la ciencia a veces el atrevimiento ilimitado vale más que la precaución tímida. Las tres graves objeciones contra la primera hipótesis se convirtieron en su inmutable demostración.

El japonés impertinente

Las investigaciones de la radiactividad condujeron al descubrimiento de las transformaciones radiactivas de los átomos. Einstein puso de manifiesto la profunda relación que existe entre la energía y la materia, y unió dos viejas leyes en una, a saber, en el único principio de conservación de la energía y de la sustancia, es decir, en la ley de conservación de la materia. Este es uno de los magníficos ejemplos que demuestra la profunda relación que existe entre las leyes de la física y los principios generales del materialismo dialéctico.

Cada vez maduraba más la necesidad de conocer las complejas leyes de las transformaciones radiactivas que se presentaban ante los científicos como un cúmulo de hipótesis empíricas desligadas. Esta necesidad comenzó a ser imperiosa, principalmente, después del año de 1908, cuando Rutherford estableció que las partículas alfa, que se desprenden de las sustancias radiactivas, eran átomos ionizados de helio. ¡El helio se obtiene de los elementos radiactivos! Esta posibilidad tan sediciosa era ya una realidad.

Había que decidirse a solucionar el enigma del átomo. Hasta entonces existía solamente la suposición de Prout, suposición que era muy general y que consistía en que los átomos de todas las sustancias se forman de algún modo del

hidrógeno. Era una hipótesis basada en que los pesos atómicos tenían carácter múltiplo, cuya exactitud comenzó a ser dudosa después de precisarse las mediciones de los pesos atómicos en una serie de elementos que habían puesto de manifiesto considerables desviaciones de este carácter. (Más tarde, una vez descubiertos los isótopos, la réplica no estaba ya sobre el tapete, mas la hipótesis de Prout no era ya necesaria).

El primer modelo del átomo pertenece a Joseph John Thomson, el célebre J.J., que a veces lo confunden con el no menos famoso William Thomson, quien más tarde recibió el título de lord Kelvin.

J.J. opinó durante un breve tiempo, que los pequeños imanes de Mayer pueden servir como buen modelo del átomo. El experimento consistía en lo siguiente. Mayer suspendía sobre un recipiente con agua un imán grande y soltaba en el líquido unos pedacitos de corcho, en los que estaban hincadas agujas imantadas. Los imanes pequeños formaban una configuración estable: uno en el centro, debajo del imán grande; alrededor de él, seis imanes pequeños que formaban un hexágono regular; después, un decágono de grandes dimensiones, y a su alrededor, un dodecágono. Mayer notó que, balanceándose, el imán grande obligaba a los imanes pequeños a desplazarse, y así, las configuraciones exteriores se convertían en eneágonos y tredecágonos. Mayor estimaba que esto hacía recordar la conducta de algunos cuerpos reales, capaces de alterar sus propiedades al endurecerse.

Por lo demás, Thomson comprendió enseguida que este modelo era demasiado complicado e incapaz de describir muchas propiedades conocidas de los átomos.

William Thomson se incorporó al juego. El notó que los experimentos con los rayos de Crookes y con las partículas beta eran testimonio de que los electrones no sólo se movían entre los átomos, sino que pasaban también a través de ellos. Suponía que el electrón, que se encuentra fuera del átomo, es atraído por éste con una fuerza proporcional al cuadrado de la distancia que hay entre sus centros. En cambio, si el electrón se mueve dentro del átomo, la atracción será proporcional al primer grado de esta distancia. Esto podía ocurrir solamente si todo el volumen del átomo estuviera relleno con algo que tuviese carga positiva y las dimensiones de los electrones fueran mucho más pequeñas que las de los átomos.

Kelvin consideraba que la neutralidad del átomo era asegurada porque en él existían tantos electrones, cuantos son necesarios para compensar la carga positiva. Están dislocados por la superficie esférica y es posible que girasen alrededor del centro.

Semejante modelo, conocido con el nombre de "átomo de Thomson", subsistió más de diez años, aunque, evidentemente, no explicara muchos hechos ni respondiera a los requisitos de la estabilidad. Así manifestó una vez más su ironía Su Majestad la Ciencia, que es benévola con los corifeos que llevan sumisamente su cola; en cambio, menosprecia a los profetas que desean adelantar su calmosa y majestuosa procesión.

En diciembre de ese mismo año, es decir, en 1903, cuando los Thomson, el joven J.J. y el venerable lord Kelvin concluían en rasgos generales la construcción del modelo del átomo, el físico japonés Nagaoka informó a la Sociedad

Físico-matemática de Tokio sobre el modelo del átomo que había construido a semejanza del sistema de Saturno y sus anillos. Al año siguiente, este comunicado apareció en la revista londinense "Nature", mas no produjo resonancia alguna entre los físicos. Actualmente, sólo podemos asombrarnos de tal incomprensión e intentar de explicarla como resultado de la influencia hipnotizante de la autoridad, la inercia de la mente o la alegación tradicional al destino de las ideas que adelantaban a su tiempo.

Nagaoka partía de que era muy necesario explicar la regularidad de las series espectrales y los fenómenos de radiactividad. En su artículo, titulado "Acerca del sistema dinámico que ilustra las rayas espectrales y los fenómenos de radiactividad", señalaba: "El átomo consta de un gran número de partículas con igual masa, situadas en círculo a iguales intervalos angulares, que se repulsan mutuamente con una fuerza inversamente proporcional a la distancia entre ellas. En el centro del círculo está situada una partícula pesada que atrae las otras partículas que forman un anillo de acuerdo con la misma ley... El sistema examinado será realizado si es que los electrones se sitúan en círculo y la carga positiva se encuentra en el centro".

El modelo de este científico podía explicar las grandes desviaciones de las partículas alfa, observadas por Geiger y Marsden, cuando las partículas alfa pasaban a través de una hoja metálica fina. Aquí, el modelo de Thomson resultaba impotente. A pesar de todo esto, el modelo planetario del átomo se asocia sólidamente con el nombre de Rutherford, quien lo hizo renacer en 1913, cuando llegó la hora, y con su ayuda fueron adquiridos datos experimentales

que convirtieron el modelo planetario de una hipótesis en una necesidad evidente.

Después de observar los espectros de los rayos X, Moseley, asistente de Rutherford, obtuvo uno de los argumentos decisivos a favor del modelo planetario: "Al átomo le es propia una magnitud característica que va aumentando regularmente al pasar de un átomo a otro (en el sistema periódico). Esta magnitud no puede ser otra cosa que la carga del núcleo interior".

El resultado que obtuvo Moseley ligaba perfectamente con la ley de transformación de los elementos radiactivos, descubierta por Soddy y Rutherford diez años antes y que había provocado grandes réplicas por parte de los partidarios conservadores del tradicional punto de vista acerca de la eternidad e inmutabilidad de los átomos.

En el modelo de Rutherford todo se puso en su lugar: en un núcleo con carga positiva transcurren todas las transformaciones radiactivas; alrededor del núcleo giran los electrones que responden por el surgimiento de los espectros y la interacción química.

La principal deficiencia del modelo planetario de Nagaoka, que tampoco Rutherford pudo superar, era la imposibilidad de ligar cuantitativamente este modelo con el fenómeno de emisión y absorción de la luz y las ondas Roentgen. El modelo no permitía calcular la longitud de las ondas emitidas y absorbidas; es más, era imposible reconciliarlo con el hecho de la existencia de los átomos. Pues, conforme a la teoría de Maxwell, el electrón que gira por la órbita debe emitir constantemente ondas electromagnéticas, entregándoles a éstas parte de su energía cinética. En este caso, la órbita del electrón

debe estrecharse cada vez más cayendo éste rápidamente en el núcleo.

Si bien alguna vez en el futuro había esperanzas de explicar con esto las transformaciones radiactivas, ahora resultaba totalmente imposible simultanear semejante modelo con la existencia de átomos estables.

Al modelo de Rutherford lo esperaba la muerte; mas no tuvo tiempo de exponerse a la profanación y al olvido, ya que en el laboratorio de Rutherford hacía casi un año que trabajaba el joven físico danés Niels Bohr.

El átomo de Bohr es el átomo de hidrógeno

Bohr comprendía perfectamente las grandes posibilidades que encerraba el modelo planetario del átomo y se planteó la tarea de salvarle del anatema con que lo estaba amenazando la física clásica.

Los salvadores sólo podían ser el cuanto de acción herético, que ya había entrado en la ciencia a despecho de su creador Planck, y el no menos faccioso fotón, cuyo padre —Einstein— fue durante muchos años después el principal oponente de Bohr en lo relacionado con los problemas más complejos y profundos de la física moderna.

Es posible que la cita sea demasiado larga, pero así podrá demostrarse mejor el surgimiento del salto más dramático que elevó a la humanidad por encima de las armoniosas moles de la física clásica.

"La existencia del cuanto de acción elemental expresa una propiedad nueva de la individualidad de los procesos físicos, totalmente ajena a las leyes clásicas de la mecánica y el electromagnetismo; ella restringe su validez con aquellos

fenómenos en los que la dimensión de acción es grande comparando con el valor del cuanto unitario, dado por la nueva constante atómica de Planck. Tal condición de ninguna manera puede ser cumplida para los electrones en los átomos, aunque de sobra le satisfagan los fenómenos en los experimentos físicos habituales. Efectivamente, sólo la existencia del cuanto de acción impide la unión de los electrones con el núcleo en una partícula pesada neutra, de dimensiones infinitamente pequeñas.

El reconocimiento de esta situación condujo inmediatamente a la idea de describir la retención de los electrones por el campo alrededor del núcleo como una serie continua de procesos individuales que transforman el átomo de un estado, de los llamados estados estacionarios, a otro estado idéntico, emitiéndose energía liberada en forma de cuanto unitario de la radiación electromagnética. Esta idea, interiormente, tiene parentesco con la exitosa interpretación einsteiniana del efecto fotoeléctrico, que tan convincentemente habíase confirmado en los trabajos de Franck y Hertz sobre la excitación de las rayas espectrales al chocar los electrones contra los átomos. Esta no sólo dio una explicación directa a las leyes enigmáticas de los espectros de rayas, despejadas por Balmer, Rydberg y Ritz, sino que, basándose en los datos espectroscópicos, condujo paulatinamente a la clasificación sistemática de los tipos de conexión estacionaria de cada electrón en el átomo. Esto dio una explicación cabal a las extraordinarias dependencias que existen entre las propiedades físicas y químicas de los elementos, dependencias expresadas en la famosa tabla de Mendeléiev. Semejante interpretación de la propiedad de la materia pare-

cía una realización del ideal antiguo — reducir la formulación de las leyes de la naturaleza al análisis de números solamente—, que superaba incluso los sueños de los pitagóricos. La principal hipótesis sobre la individualidad de los procesos atómicos significaba, al mismo tiempo, una renuncia inevitable de un detallado nexo causal entre los acontecimientos físicos, nexo cuya existencia fue durante siglos la base indiscutible de la filosofía de las ciencias naturales".

Bohr formuló sus ideas en forma de tres postulados:

— el átomo puede encontrarse en una serie de determinados estados estacionarios, sin perder energía para la emisión;

— la emisión surge al pasar de un estado estacionario a otro;

— la frecuencia de radiación se determina por la diferencia de las energías correspondientes a dos estados estacionarios, entre los cuales se efectúa el paso, y la constante de Planck.

Bohr empleó estos postulados en el átomo más simple, el de hidrógeno, alrededor de cuyo núcleo gira un solo electrón. Cada paso era un triunfo. El radio de la órbita del electrón coincidía bien con el radio del átomo de hidrógeno, conocido por los experimentos hechos con gases. El cálculo de las frecuencias relacionadas con el paso entre los estados estacionarios simples coincidió con las conocidas series de rayas de Balmer y Paschen, y permitió calcular la constante de Rydberg, determinada anteriormente sólo por vía empírica.

Bohr aplicó su teoría al ion de helio: sistema que tiene también un solo electrón, pero que su núcleo es cuatro veces más pesado que el del átomo de hidrógeno. Bohr obtuvo una serie de

frecuencias que coincidía con la serio de rayas ospectrales observadas en algunas estrellas y que en aquel tiempo se atribuían al hidrógeno. Más tarde, la razón que tenía Bohr fue otro triunfo de su teoría.

Mas los intentos de aplicar la teoría al átomo no ionizado de helio —sistoma con dos electrones— y a otros átomos más complejos, chocaron contra las insuperables dificultades matemáticas.

Estas dificultades las suporó, on sumo grado, el teórico de la vieja generación Sommerfeld, quien introdujo en el modelo de Bohr, a la par con las órbitas circulares, órbitas elípticas más complojas do electrones. Esto le permitió deducír mediante cálculos el principio de combinación, obtenido por Ritz haciendo una simple confrontación de los datos del exporimento. Después, Sommerfeld, valorando la volocidad de movimiento de los electrones por sus órbitas, estableció que dobido a quo son velocidades tan grandes, para efectuar los cáculos es necesario utilizar la teoría do la relatividad de Einstein.

Así es cómo pudo oxplicar la existencia do muchas rayas espectrales que no formaban parte de las series espectrales conocidas. Resulta quo éstas surgen debido a que las órbitas elípticas, de acuerdo con las condiciones de la teoría de la relatividad, giran alrededor del núcleo, de tal modo que el electrón no se muevo por una elipso cerrada, sino por un original rosetón infinito. Por lo demás, la teoría, incluso después de perfeccionarla, seguía siendo demasiado compleja y lo principal era que no todas las predicciones concordaban con los oxperimentos.

Los físicos iban convenciéndose poco a poco de que se necesitaban cambios radicales.

Si el futuro historiador quisiese establecer cuándo los sabios, que durante más de dos mil años estuvieron penetrando en la médula de la luz y los átomos, dieron el primer paso directo hacia el láser, tendría que recordar, sin duda alguna, los años fértiles.

Einstein no podía prever las consecuencias que había de acarrear el paso que él hizo en 1917. Este paso consistía en aplicar al átomo de Bohr aquel enfoque estadístico que el propio Einstein y el científico polaco Smoluchowsky emplearon en los cálculos del misterioso movimiento browniano: la danza incesante de las pequeñísimas partículas.

Einstein notó que los actos de emisión y absorción de la luz deben subordinarse a las mismas regularidades probabilísticas que la desintegración radiactiva. Es imposible predecir cada acto unitario y éste es casual, pero, como promedio, se manifiestan regularidades precisas que responden a las leyes objetivas de la naturaleza.

El supuso que en los átomos, no sometidos a influencias exteriores, los electrones pasan del estado con energía más alta al estado con energía más baja con una probabilidad totalmente determinada, condicionada por la estructura del átomo. La intensidad de radiación, ligada con tales transiciones espontáneas, es proporcional al número de átomos que se encuentran en estado con alta energía, o sea, átomos excitados.

En cambio, si los átomos se encuentran en un campo de radiación, cuya frecuencia coincide con una de las frecuencias de Bohr, resulta que la probabilidad de la transición electrónica, relacionada con la emisión o la absorción del fotón

de esta frecuencia, es proporcional a la intensidad del campo.

De estas dos hipótesis se deducían dos consecuencias importantísimas.

De ellas emana directamente la fórmula de Planck para la emisión del "cuerpo negro", que había eliminado el peligro de la "catástrofe ultravioleta". Esto daba seguridad de que Einstein tenía razón.

Sin embargo, la segunda consecuencia hacía ponerse en guardia.

De las suposiciones de Einstein resultaba que el fotón se llevaba del átomo no sólo la energía, sino también el impulso; que el hecho elemental de la radiación de la luz no puede ser descrito por la onda esférica. Así entró de nuevo en la ciencia la necesidad de unificar las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz, puesto que ahora los fotones, una vez adquirido el impulso, se asemejaban nuevamente a las partículas. Ahora sí que a la física la habían invadido las leyes de la ocasión y ya no se las podía considerar como la mera vía para simplificar los cálculos demasiado voluminosos en los problemas sobre multitud de partículas. Las leyes probabilísticas resultaron estar ligadas con los actos unitarios elementales. Solamente mucho más tarde pudo aclararse cómo todo esto estaba relacionado con el láser. Pero antes, en la ciencia tenían que ocurrir muchos acontecimientos importantes.

Tres obras maestras

Año de 1911. El umbral de la ciencia lo atravesaba una mente interesantísima. Luis de Broglie comenzaba su vida habiendo adquirido el

grado de bachiller y después, licenciado en literatura por la parte histórica. Pero a él le atraía la actividad a la que se había consagrado su hermano. A través de éste, Luis se entera de los informes examinados en un congreso físico y dedicados a los cuantos. Los cuantos definieron el destino del joven.

Principió trabajando en el laboratorio de su hermano. Sus primeros trabajos fueron dedicados a la radiación X y al efecto fotoeléctrico. Mas la historia interrumpió este inicio tan original: comenzó la Primera Guerra Mundial. El historiador-físico-soldado entregó cinco años de su vida al ejército. En 1919, terminado el servicio militar, le apasiona por completo la teoría einsteiniana de los cuantos de luz. Le aguijoneó precisamente aquello que a los venerables sabios alemanes les parecía sospechoso en la insolente teoría.

Einstein ni siquiera pretendía explicar, por medio de los cuantos, la aparición del color en las películas finas —por ejemplo, el colorido irisado del petróleo derramado en el agua— y otros fenómenos de interferencia. Si consideramos que la luz es solamente partículas, esto no se puede explicar. Einstein era un físico demasiado profundo para intentar hacerlo. Resultaría un trabajo burdo.

El creador de los cuantos de luz dejaba esta tarea para la óptica ondulatoria. A ella le era más fácil, pues partía de que la luz es una onda. Mas la unilateralidad de cada una de las teorías no asustaba a Einstein. El sabio opinaba que esta dualidad era lógica y que ella constituía la base de la naturaleza de la luz. En unas condiciones, la luz existe como onda continua; en otras, interviene de forma no menos real como un

flujo de cuantos, que más tarde recibieron el nombre de fotones.

Einstein estaba señero en su enfoque de la naturaleza de la luz. Incluso más tarde, después de que creó la teoría de la relatividad y lo situaron junto a Newton, la teoría cuántica de la luz quedó sin comprender y fue olvidada. Aunque ayudó a Bohr a crear la teoría del átomo, tampoco ello pudo asegurarle el reconocimiento. El propio Einstein, atareado con problemas cada vez más complejos, los cuales surgían a medida que iba desarrollándose su trabajo principal, no volvió a preocuparse de estas cuestiones.

Luis de Broglie abrazó las ideas de Einstein. Siendo muy joven aún, le sorprendió la analogía que existía entre las ecuaciones que dirigían el movimiento de las ondas y el comportamiento de los sistemas mecánicos complejos. Ahora, la inconcebible aparición de números enteros en las reglas que permitían calcular las órbitas del átomo de hidrógeno, le hizo pensar en la afinidad de estas reglas con las leyes del movimiento ondulatorio, en las que aparecen constantemente números enteros simples.

Guiándose por las ideas de Einstein y, en particular, por sus consideraciones sobre la relación de la masa y la energía, deducidas de la teoría de la relatividad, De Broglie realizó un trabajo para las partículas, que era inverso al que efectuara Einstein para las ondas de luz. Einstein vinculó las ondas electromagnéticas con las partículas de luz; De Broglie adhirió el movimiento de las partículas con la propagación de las ondas que denominó ondas de la materia. A finales de verano de 1923, en "Informes de la Academia de Ciencias de Francia" aparecieron tres artículos, tres obras maestras, que contenían



los principios fundamentales de la mecánica ondulatoria.

Más tarde, en la tesis de doctorado, él había desarrollado y pulido con tanta perfección las ideas de la mecánica ondulatoria que el jurado de la famosa Sorbona, del que formaban parte corifeos de la ciencia francesa, como Paul Langevin y Joan Perrin, la valoró, sin vacilación alguna, como "un brillante de pura ley".

Al cabo de un año, el físico Werner Heisenberg, de Gottingen, de 25 años de edad, publicó su famosa mecánica matricial. Era un asombroso engendro de la intuición de un científico, que liberaba a otros, en cierto modo, de la necesidad de... pensar. El trabajo principal se consumía en asimilar los desacostumbrados métodos matemáticos. A continuación, todo marchaba maravillosamente bien. Había que escribir las condiciones del problema inmediato en forma matricial simbólica (para esto, naturalmente, hacía falta romper la cabeza). Pero luego, ya se podía obrar según las reglas elaboradas de una vez y para siempre. Al final de este trabajo, casi mecánico aparecía la solución; y fue la experiencia la que ayudaba a discernirla entre la gran cantidad de fórmulas.

En la primavera de 1926, el joven profesor de Zurich, Erwin Schrödinger, abrió otra entresaca en el enmarañado bosque del micromundo. Schrödinger obtuvo una magnífica ecuación, hoy día conocida con el nombre de ecuación de la onda. El demostró que en casos complicados, cuando participan en el proceso muchas partículas a la vez, la onda correspondiente, que describe su movimiento, se hace muy compleja. Esta no cabe ya en los límites de un espacio tridimensional habitual. ¡Para describirla hay que imaginarse un espacio con muchas dimensiones!

En la física del micromundo se había introducido, de manera sólida, el espacio multidimensional abstracto, que hasta entonces fue patrimonio de la física clásica durante muchos años.

Así, pues, como resultado del inspirado trabajo de De Broglie, Heisenberg y Schrödinger

nació la nueva mecánica, la cuántica, un arma maravillosa, aunque poco comprensible, pero cargada de explosivos matemáticos para seguir las incursiones en el micromundo.

Se incluían constantemente nuevas fuerzas que ayudaban a superar las dificultades que surgían en el camino de la teoría triúnica. No obstante, la principal dirección aquí no conducía al láser, sino a la bomba y a la central atómicas. Por tanto, dejemos este camino y volvamos atrás, para poder seguir el desarrollo de otras ideas que tienen relación directa con nuestro tema.

Un paso atrás, un salto adelante

Volvamos al principio de nuestro siglo, cuando entraba en la ciencia un joven de Odesa, Leonid Mandelshtam.

En estos años tan agitados, a Mandelshtam le atraían los trabajos de Planck, que deseaba comprender por qué la luz se debilitaba al pasar por un medio transparente y limpio. La causa podía ser solamente la difusión. Mas, ¿qué podía dispersar a la luz en un gas limpio y homogéneo?

¿Qué hacer con los experimentos que con tan asombrosa precisión confirmaban la teoría de la difusión que había reinado anteriormente? En ella todo parecía irrefutable y como si protestara contra cualquier intromisión.

A Mandelshtam no le desconcertó la coincidencia del resultado de los experimentos con la teoría anterior. En 1907, escribió sobre uno de estos experimentos: "Esta coincidencia debe considerarse una casualidad".

Mandelshtam demostró mediante una serie

de trabajos que el movimiento caótico de las moléculas no hace al gas homogéneo. En un gas real siempre hay pequeñísimas rarificaciones y compactaciones que se forman como resultado del movimiento térmico caótico. Son ellas, precisamente, las que conducen a la difusión de la luz, ya que perturban la homogeneidad óptica del aire.

Mandelshtam señalaba: "Si el medio no es homogéneo en sentido óptico, entonces, hablando en general, la luz incidente se dispersa también hacia los lados".

Más tarde, en 1917, Mandelshtam y el científico francés León Brillouin comenzaron a estudiar, independientemente uno del otro, cómo transcurre la dispersión de la luz en los líquidos transparentes homogéneos, así como en los cuerpos sólidos, cuya densidad es muchísimo más alta que la del aire.

Resultaba que aquí juega un gran papel también la fluctuación de la densidad, sujeta a leyes afines a las que ponen en movimiento las partículas brownianas.

Pero en los cuerpos líquidos y sólidos, que los físicos unifican con una noción generalizadora —medios condensados— se entremete, en el proceso de la difusión de la luz, un nuevo factor, cuyas raíces se extienden hasta 1820, cuando los franceses Dulong y Petit establecieron el notorio hecho de la igualdad del calor específico para todos los cuerpos sólidos. Los intentos de explicar esta regularidad dieron un empujón a muchas investigaciones de gran porvenir. Mas la causa de dicha igualdad tan asombrosa quedó sin aclarar y el hecho experimental se convirtió con el tiempo en la ley de Dulong y Petit. Solamente al cabo de más de medio siglo, el profesor

Weber, de Zurich, descubrió que el calor específico del diamante, del grafito, del boro y del silicio se desvían bruscamente hacia el lado menor de la ley de Dulong y Petit. Estableció también que al elevar la temperatura disminuye la desviación descubierta por él.

A Einstein, quien en los años estudiantiles había asistido a las conferencias de Weber, no le podían ser indiferentes sus descubrimientos. Se imaginaba a los átomos de los cuerpos sólidos oscilando alrededor de los estados estables de equilibrio, determinados por la interacción de sus campos eléctricos. Las propiedades de estos sistemas atómicos hacen recordar, en rasgos generales, el comportamiento del sistema de pequeñas pesas, unidas con muelles. Einstein tendía describir en todos los casos el sistema complejo con ayuda de los modelos más simples, así como con las fórmulas más sencillas, con tal de que reprodujeran los rasgos esenciales de los fenómenos reales. Este camino también le condujo al éxito. Aplicando la fórmula de Planck a su modelo, él pudo explicar las observaciones de Weber.

Más tarde, Debye desarrolló el trabajo de Einstein y demostró que las oscilaciones térmicas de los cuerpos sólidos son de la misma naturaleza que las vibraciones acústicas, pero sus frecuencias abarcan un diapasón muchísimo mayor que el que capta nuestro oído. Eran las oscilaciones ultrasónicas e hipersónicas, asimiladas por la técnica mucho más tarde. Pero las ondas acústicas están relacionadas con la compresión y la rarificación, con la alteración de la densidad de la materia. Si estas ondas son engendradas por los movimientos térmicos, su superposición conduce a cambios caóticos, a fluctuaciones de la

densidad. Era suficiente comprender esto para que quedase claro el mecanismo de la difusión de la luz en medios condensados. Este proceso es conocido hoy día como dispersión de Mandelshtam—Brillouin, y adquirió gran importancia después de crear el láser.

Un hallazgo extraordinario

Muchos años después, en 1925, Mandelshtam, siendo ya jefe de cátedra de la Universidad de Moscú, y el hábil experimentador Grigori Samuílovich Landsberg, continuaban investigando la dispersión de la luz.

Los resultados de la labor conjunta fueron inesperados y extraordinarios. Estos científicos habían descubierto lo que no esperaban y lo que no estaba predicho por la teoría. Habían descubierto un fenómeno totalmente nuevo. Mas, ¿qué fenómeno? ¿Tal vez fuese un error? En la luz difusa aparecía toda una combinación de frecuencias que no existían en la luz incidente a la sustancia.

En las fotografías del espectro de la luz difusa aparecían obstinadamente rayas débiles, aunque bien claras, que eran testimonio de la existencia de frecuencias "excedentes" en la luz difusa. Los científicos estuvieron buscando durante muchos meses una explicación a ese fenómeno. ¿De dónde aparecieron frecuencias "ajenas" en la luz difusa?

Un buen día, a Mandelshtam se le ocurrió, por fin, una idea asombrosa. Era un hallazgo extraordinario, ese mismo que en la actualidad se considera uno de los descubrimientos más importantes de siglo XX.

La profunda intuición y la mente analítica

clara de Mandelshtam sugerían al científico que las variaciones de frecuencia de la luz difusa descubiertas no pueden ser provocadas por aquellas fuerzas intermoleculares que nivelan las heterogeneidades casuales de la densidad del aire u originan ondas ultrasónicas —de Debye— en los cuerpos sólidos. Para el científico estaba claro lo siguiente: la causa se oculta, sin duda alguna, en el interior de las propias moléculas de la materia, y el fenómeno es estimulado por las oscilaciones intramoleculares de los átomos que forman la molécula. Estas oscilaciones transcurren con una frecuencia mucho más alta que las oscilaciones que acompañan la formación y la resorción de las heterogeneidades casuales del medio. Estas oscilaciones de los átomos en la molécula son precisamente las que se revelan en la luz difusa. Parece como si los átomos la marcaran, como si dejaran en ellas sus huellas, cifrándola con frecuencias complementarias.

De este modo, para explicar el nuevo fenómeno, denominado "dispersión de combinación de la luz", bastaba con que la teoría de la dispersión molecular, creada por Mandelshtam, fuese complementada con datos sobre la influencia que ejercen las oscilaciones de los átomos dentro de la molécula.

Posteriormente, de este descubrimiento se sacó un provecho enorme y encontró gran aplicación práctica.

En nuestros días, la dispersión combinada es la base de uno de los tipos de láser.

La alusión

Sabemos ya cómo Einstein dió el primer paso hacia el láser. Pero en aquellos tiempos nadie sabía, ni él mismo siquiera, a dónde conducía

el sendero por el que caminaba el eminente sabio. A él le interesaba otra cosa: solamente pretendía eliminar las contradicciones existentes en sazón entre la óptica y la termodinámica.

Los ópticos, antes de Einstein, sabían ya que la radiación espontánea de los átomos no dependía de las condiciones exteriores, sino que se debía únicamente a las propiedades de los átomos. Por el contrario, la absorción aumenta junto con la intensidad de la luz incidente.

Esto era una conclusión puramente teórica. La emisión estimulada no se sometía a la observación: la camuflaba otra absorción mucho más fuerte.

El físico soviético Valentín Fabrikant se dio cuenta de que la emisión estimulada no podía observarse sólo porque en condiciones habituales se lo impide la ley de Boltzmann. De acuerdo con esto, los átomos prefieren encontrarse en estados de baja energía, igual que las moléculas de aire se acumulan en las capas bajas de la atmósfera. Abajo, el aire es más denso; a medida que aumenta la altura, va enrareciéndose más.

Lo mismo ocurre con los átomos. En estados de baja energía, hay muchos; en estados de alta energía, hay menos. En vista de que un campo electromagnético exterior, según la teoría de Einstein, con igual probabilidad estimula al átomo aislado a que absorba el fotón y eleve su energía o a que emita el fotón y se deshaga de la energía excesiva, el resultado se determina por la ley de Boltzmann: en condiciones habituales, es predominante el número de átomos capaces de efectuar la absorción.

Esto significa, señalaba Fabrikant, que es menester crear condiciones insólitas, en las que no pueda dominar la ley de Boltzmann. Para esto

es necesario perturbar el equilibrio térmico del medio y, además, es preciso hacerlo con tal fuerza que resulte mayor el número de átomos con alta energía que el número de átomos con baja energía. En este caso, el medio intensificará la luz, en vez de absorberla...

Corrían los años. Comenzó la Segunda Guerra Mundial. Los hitlerianos atacaron pérfidamente a la Unión Soviética. El pueblo encaminó todas sus fuerzas a la lucha contra el enemigo. Junto con todo el pueblo se encontraban, claro está, los hombres de ciencia.

Por fin, llegó la victoria tan esperada. La gente regresaba al trabajo pacífico. Todo el país, cada hombre, se dedicó a realizar las medidas más urgentes. Y sólo al cabo de cinco años pudo Fabrikant volver a su antiguo trabajo. Entonces cada uno pensaba, ante todo, en aquello que pudiera dar provecho inmediato. Fabrikant comprendió que su tesis de doctorado podía también encontrar aplicación técnica. Junto con otros colaboradores, puso manos a la obra. Su balance era el contrato de invención del método para amplificar las ondas electromagnéticas con ayuda de emisión estimulada. La fecha de la prioridad fue el año de 1951. En el contrato se indicaban varios métodos para alcanzar el resultado deseado en los medios gaseosos. No obstante, los autores, a pesar de todos sus esfuerzos, no lograron realizarlos.

Por desgracia, la publicación del contrato se demoró hasta el año de 1959, así que la prioridad de los autores adquirió, en grado considerable, un carácter formal y, prácticamente, noinfluyó en los trabajos ulteriores de otros científicos.

Ese mismo año de 1951, el eminente físico Pairsell y el joven radiofísico Pound lograron

perturbar para un corto plazo el equilibrio térmico de la sustancia, de manera tan fuerte que ésta se convirtió en activa, es decir, la emisión estimulada superaba en ella la absorción de las ondas electromagnéticas. Verdad es que no eran ondas luminosas, sino radioeléctricas, pero el efecto no dejaba de ser menos importante por eso. El experimento era muy simple. Los físicos situaban un cristal de fluoruro de litio en un campo magnético muy fuerte y este cristal se imantaba. La mayoría de los núcleos de los átomos de litio y de flúor, semejantes a imanes pequeños, giraban a lo largo del campo magnético, de tal modo que su energía en el campo fuese la mínima. Luego había que sacar rápidamente el cristal del campo, darle la vuelta de manera que el lado que antes estaba hacia el polo norte del imán indicara el polo sur, e introducir de nuevo el cristal. Ahora, la mayoría de los núcleos —imanes pequeños— están dirigidos contra el campo. La energía de éstos en el campo será máxima. Tienden a deshacerse de la energía excesiva, emitiendo ondas radioeléctricas, y esta emisión es espontánea. Pero Pairsell y Pound no se daban cuenta de que bastaba con dirigir hacia el cristal una onda radioeléctrica exterior, para que ésta se amplificara. Ambos físicos se encontraban en el umbral del descubrimiento, mas no dieron el paso decisivo.

Los delanteros

Para comprender por qué las profundas ideas de Einstein y de Dirac, las proposiciones concretas de Fabrikant y el experimento sorprendente de Pairsell y Pound no condujeron directamente a la creación del láser ni al surgimiento de la

electrónica cuántica, es necesario apartarse un poco de los destinos de la investigación de la luz.

En 1939, en el Instituto de Física de la Academia de Ciencias de la URSS, situado entonces en la calle 3a Miusskaya, de Moscú, apareció Sasha Prójorov, egresado de la Universidad de Leningrado. Ansiaba dedicarse a la radiofísica y se incorporó a las investigaciones de la propagación de las ondas radioeléctricas, investigaciones que se efectuaban bajo la dirección de dos científicos amigos: Leonid Mandelshtam y Nikolái Papaleksi.

En el laboratorio de oscilaciones todo el mundo estaba compenetrado con la idea de conocer las principales regularidades que vinculaban entre sí los diversos fenómenos. El principal guía de acción era la teoría general de las oscilaciones, teoría que en aquellos tiempos se encontraba en la etapa de la construcción de su parte más compleja, la parte no lineal. Esta teoría permitía estudiar, desde un punto de vista único, el trabajo de la válvula osciladora de las ondas radioeléctricas y el funcionamiento del corazón humano, la propagación de las ondas radioeléctricas y la propagación del sonido, el misterioso efecto Luxemburgo-Gorki y el paso de la luz a través de los cristales. En total, los temas eran muchísimos.

Aquí enseñaban a emplear la fuerza inconmensurable de las matemáticas, pero, en la medida de lo posible, procuraban aplicar los métodos más sencillos y evidentes. A través de los fenómenos ópticos se tendían puentes al mundo de los átomos y a la rama de los cuantos, que hacía poco que se había asimilado. De aquí pasaban a las velocidades límites, al mundo de

la teoría de la relatividad. Y lo principal era que aquí enseñaban a encajar la relación entre la idea y su plasmación técnica. En una palabra, Prójorov fue a parar a una de las escuelas más avanzadas de la física moderna y, además, él aquí sí que encajaba. La teoría se combinaba con el experimento; el trabajo en el laboratorio, con las expediciones al Mar Blanco, Cáucaso, Mar de Ríbinsk.

Pero el trabajo en el laboratorio no duró mucho. Comenzó la guerra y tuvo que sustituir la romántica búsqueda científica por el servicio de exploración en el ejército. Después de la guerra, como consecuencia de una herida grave, largo tiempo no pudo participar en las investigaciones experimentales sobre el terreno. No tuvo otro remedio que trabajar solamente en el laboratorio y cambiar el temario científico. Sin embargo, en estas condiciones siguió aportando su óbolo a la causa común, continuó elevando la precisión de los sistemas radar y de radionavegación.

Llegó a ser posgraduado del profesor Serguéi Mijáilovich Rítov, actual miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS, científico profundo e interesante. Al cabo de tres años, después de efectuar investigaciones teóricas y experimentales complejas, defendió la tesis de candidato a doctor.

En ese tiempo, vino a trabajar al laboratorio el practicante Nikolái Básov. La guerra había dejado también en su vida una triste huella. Llamado a filas, fue destinado a la Academia Médico-militar y sin terminarla le enviaron al frente. A raíz de la victoria, participó en el desmontaje de las fábricas en las que los hitlerianos preparaban sustancias tóxicas, donde sufrió una

fuerte intoxicación y estuvo enfermo durante mucho tiempo.

Después del licenciamiento, Básov escogió el Instituto Físico-ingenieril. Consideraba que la física y la técnica eran una cosa inseparable; comprendía perfectamente el espíritu de nuestro siglo. Poco a poco le iba atrayendo cada vez más la física teórica por su fuerza dominante, sus enormes éxitos y sus misterios apasionadores. Es posible que esto ocurriese porque la cátedra de física teórica del instituto la dirigía el académico Igor Evguénievich Tamm, lúcido representante de la escuela de Mandelshtam. Básov era uno de los mejores estudiantes de la cátedra. Mas, luego de haber pasado las clases prácticas en el laboratorio de Prójorov, del Instituto de Física, donde realizaba trabajos puramente experimentales, se incorporó a ellos con toda su energía que le era tan propia. Al poco tiempo, un año antes del plazo establecido, defendió proyecto para obtener el diploma de ingeniero Aquí, a las investigaciones experimentales se les daba no menos importancia que a las teóricas.

Básov, junto con Prójorov, se entusiasmó con la radioespectroscopia. Una de las investigaciones en esta rama fue el tema de la tesis para adquirir el título de candidato a doctor.

El trabajo común de los jóvenes radiofísicos, quienes dominaban perfectamente el arte del experimento delicado y los métodos de la teoría moderna, y que además poseían una intuición extraordinaria y sentían lo nuevo, les condujo al punto crucial de su suerte científica: a la creación del oscilador molecular de ondas radioeléctricas, al descubrimiento de los principios fundamentales que sentaron las bases de una nueva

rama de la ciencia, que denominaron radiofísica cuántica.

En ese mismo tiempo, aproximadamente, al otro lado del océano, en la Universidad de Columbia, de la ciudad de Nueva York, entraba en la ciencia, casi por el mismo camino, el joven físico Charles Townes. La Universidad de Columbia, fundada en 1754, se había convertido en un gran centro científico ya antes de que el desenfrenamiento del fascismo en Italia y Alemania y la ocupación de los países de Europa Central y Occidental suscitaron la emigración en masa de científicos. Notemos de paso, que incluso en los años 20 de nuestro siglo, la Universidad de Columbia era el único lugar de esa gran ciudad, donde uno podía dedicarse a la física.

Al comienzo de la Segunda Guerra Mundial, aquí ya se había formado un centro de primera categoría en la investigación de los haces atómicos. Su fundador, Isidoro Rabí, había iniciado sus trabajos en Europa, en el laboratorio de Stern, el patriarca de semejantes investigaciones. No obstante, Rabí dio un paso esencial: combinó la técnica de los haces atómicos con la radiotécnica. Así fue, en realidad, cómo surgió la radioespectroscopia.

La radio se unió con los átomos y las moléculas. Apareció la posibilidad de investigar con extraordinaria precisión muchas propiedades de los núcleos atómicos, mas esto no condujo aún al surgimiento de una nueva rama de la ciencia.

La radioespectroscopia nació por segunda vez y empezó a desarrollarse rápidamente después de la Segunda Guerra Mundial, cuando se puso al alcance de los físicos la técnica de las ondas radioeléctricas centimétricas, creada en el curso del desarrollo de la radiolocalización.

En 1946, Townes publicó sus primeros trabajos de radioespectroscopia. La primera publicación contenía varios renglones. Era, simplemente, una anotación (un "abstracto", según la terminología inglesa) acerca de la investigación de la molécula de amoníaco. La segunda, era ya de una página, aproximadamente, y contenía una carta a la redacción de la revista "Physical Review" sobre la investigación de la molécula de agua. Los trabajos no causaron gran impresión. En aquel tiempo, las investigaciones del amoníaco y del agua estaban efectuándose en gran escala ya en muchos laboratorios y posiblemente que a un nivel más alto.

Al primer paso le siguió una carrera rápida: al año siguiente publicó dos cartas y tres anotaciones que contenían ya nuevos e interesantes resultados; pasado un año más, Townes llegó a ser uno de los principales especialistas en la rama de la radioespectroscopia de los gases.

El primogénito

Muchas de las fechas críticas parecen ser muy convencionales. Esto no se refiere solamente al comienzo de nuestra era, sino también al principio de siglo del vapor, del siglo de la electricidad... Sólo a principios del siglo atómico se produjo la espantosa explosión que conmovió el desierto del Estado de Nuevo México.

El origen de la radiofísica cuántica se remonta al año de 1954, cuando Básov y Prójorov en el Instituto de Física P. N. Lébedev, de Moscú, y Townes junto con Gordon y Zeïger, en la Universidad de Columbia, de Nueva York, lograron (prácticamente, al mismo tiempo e independientemente unos de los otros) la generación de ondas

radioeléctricas con ayuda de moléculas. Esto era un aparato nuevo. En Moscú lo denominaron oscilador molecular; en Nueva York lo bautizaron con el nombre de máser. La palabra "máser" es la sigla de la expresión inglesa que describe el principio, en el que se basa el trabajo del aparato "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation."

Mas, debido a que el oscilador molecular era un aparato que funcionaba, su aparición significaba el nacimiento de gemelos. Junto con la radiofísica cuántica, surgió la electrónica cuántica, que así fue como denominaron más tarde la dirección técnica de esta nueva ciencia.

Los átomos, uniéndose en distintas combinaciones, forman toda la diversidad del mundo. Incluso siendo átomos del mismo tipo, pueden agruparse de diferente manera. Así, el carbono puede presentársenos como coque poco agraciado, como grafito negro brillante o como un diamante deslumbrador. Todo depende de las condiciones creadas por la naturaleza o el hombre. Por ejemplo, el óxido de cromo tan común, luego de caer en el corindón incoloro, transforma a éste en un maravilloso rubí, y al entrar en el berilo, igualmente incoloro, crea la esmeralda, considerada una piedra más preciosa que el brillante.

En el oscilador molecular se unificaron y cristalizaron las ideas y los métodos de muchos hombres geniales. Integrando estas ideas y métodos en sí, hizo el resumen de toda una época y abrió nuevas perspectivas ante la humanidad.

Las variantes soviética y norteamericana de los osciladores moleculares son verdaderos hermanos gemelos. Son idénticos en el sentido genético. Mas, al desarrollarse en condiciones dife-

rentes, adquirieron algunas distinciones exteriores. Igual que como ocurre con la gente. Así, el color de la cara de los mellizos puede ser moreno y pálido, en dependencia del clima, mientras que la figura varía conforme a la afición culinaria de la esposa.

El corazón de ambos aparatos es el resonador de cavidad. En él, por influencia de su campo electromagnético, transcurre la emisión estimulada de moléculas. Ejecuta la reacción, la conexión entre las moléculas que ya les ha dado tiempo de emitir, y aquellas que todavía están por hacerlo. Asegura una alta ordenación de esta radiación colectiva. Una ordenación que antes no era propia de la radiación de las moléculas y los átomos, pero que es una particularidad característica de las ondas radioeléctricas. Así, pues, el corazón en ambos aparatos desempeña la misma función y acciona en correspondencia con las leyes únicas. Aquí se combinan la emisión estimulada con la reacción. Se diferencian solamente las dimensiones de los resonadores, pero esto no influye casi en el trabajo del aparato.

Tanto en Moscú como en Nueva York usaban como sustancia activa al amoníaco: gas que llegó a ser la piedra de toque de la radioespectroscopia. Sus moléculas poseen las rayas espectrales más intensas en la gama de ondas centimétricas, la más cómoda para efectuar experimentos. Las propiedades de la molécula están bien estudiadas y permiten hacer, de manera sencilla, el paso más importante, sin el cual el oscilador molecular seguiría siendo un montón de chatarra. Aquí se trata de la perturbación del equilibrio térmico; perturbación tan fuerte, que como resultado el número de moléculas con nivel energético más alto se hace mayor que el número de molécu-

las que había quedado con bajo nivel energético. De lograrse esto, el conjunto de moléculas, una vez caído en el campo del resonador, comienza a emitir ondas radioeléctricas, intensificando el campo. En cambio, si el equilibrio no está perturbado lo suficiente o no ha sido perturbado en absoluto, en el conjunto de moléculas predominarán las que se encuentren abajo, lo que conducirá a una simple absorción de la energía por parte de las ondas radioeléctricas.

* * *

Pero continuemos comparando nuestros gemelos. Todas sus piezas esenciales están situadas en el interior de una caja metálica. Desde luego, la forma de las cajas es distinta, aunque sea idéntica su designación. En el interior debe estar asegurado el vacío. La entrada de aire es intolerable. El vacío se asegura por medio de bombas especiales. Estas se producen en distintas fábricas, pero también ellas son gemelas. Pueden bombear, en la medida necesaria, el aire de los aparatos; sin embargo, no pueden ingeniárselas con la masa de amoníaco que, según los cálculos, debe ingresar en los aparatos durante el trabajo. En el Instituto de Física, igual que en la Universidad de Columbia, el nitrógeno líquido acudió en ayuda de las bombas. Este elemento refrigera las superficies metálicas especiales hasta la temperatura de 77 grados por la escala de Kelvin, y el amoníaco va helándose sobre ellas, formando poco a poco una capa parecida a la escarcha. Esto puede verse a través de las ventanillas de inspección que tienen los aparatos. El amoníaco ingresa en los aparatos de los balones. Primero entra en un cilindrito que

tiene una de las paredes hecha de hoja metálica con muchísimos agujeros pequeñísimos. A través de los agujeros, sale al vacío un haz de moléculas de amoníaco. Haz molecular. Aquí no hay juego de palabras. El haz molecular, según la terminología de los físicos, es un haz de moléculas que salen con gran rapidez al vacío, pero de tal modo que vuelan casi en paralelo una de la otra y, prácticamente, no tropiezan entre sí. Estas condiciones pueden lograrse seleccionando el tamaño de los agujeros en la hoja metálica y la presión del gas delante de ella, correspondientemente con las reglas determinadas por las propiedades de los gases.

El detalle principal del oscilador molecular es el condensador cuadripolar: un condensador formado por cuatro pequeñas barras de forma especial, uniendo uno sí y otro no al polo positivo y al polo negativo del rectificador de alto voltaje. El condensador está instalado entre la fuente del haz molecular y el orificio de entrada del resonador. El campo del condensador actúa sobre las moléculas de amoníaco de tal modo que aquellas que se encuentran en bajos estados energéticos son arrojadas hacia un lado, mientras que las que se encuentran en altos estados energéticos se dirigen al resonador. De este modo, llega al resonador un haz de moléculas, la mayoría de las cuales poseen exceso de energía interna. A este haz los físicos lo denominan haz invertido. Bajo la acción del campo del resonador, las moléculas del haz entregan al campo el exceso de su energía interna. Así es cómo las moléculas generan las ondas radioeléctricas.

La lógica de la ciencia mantenía a los físicos en márgenes muy rígidos. Precisamente por eso ambos grupos iban por vías tan semejan-

tes, como si se intercambiasen constantemente de impresiones, como si examinasen conjuntamente sus planes, sus logros y sus fracasos. ¿Podía haber un ejemplo más convincente que demostrara la unidad del proceso científico?

Básov, Prójorov y Townes trabajaron intensamente en la investigación y en el perfeccionamiento del oscilador molecular. No obstante, esto era sólo el primer paso dado en la nueva dirección. El estrechísimo sendero, que conducía a lo desconocido, iba ensanchándose rápidamente, convirtiéndose en un amplio camino, del que salían cada vez más nuevas vías. Si ante los primeros descubridores seguían apareciendo rocas punzantes y precipicios, tras ellos quedaba un camino liso. Y si miramos hacia atrás, podemos ver cómo allá, a lo lejos, el camino se convertía en una carretera asfaltada, por la que circulan automóviles, y los felices padres pasean por las aceras a sus hijos en cochecitos.

Nosotros escogemos el camino que nos conduce al láser.

El rayo rojo

A mediados de septiembre de 1959, se reunió en el tranquilo pueblo de High View, cerca de Nueva York, un grupo de científicos de distintas nacionalidades. Eran los participantes en la primera Conferencia Internacional de Electrónica Cuántica. Asistieron tan pocos, en comparación con otras conferencias internacionales, que sus organizadores pudieron incluir la lista de todos los participantes en el volumen de trabajo de la conferencia. Junto con Básov, Prójorov y Townes, figuraban los nombres de muchos famosos físicos contemporáneos.

La conferencia, lo mismo que un espejo, reflejaba las direcciones principales de la ciencia óptica. La mayoría de los informes y de las conversaciones en los pasillos giraban alrededor de los osciladores moleculares, los relojes atómicos y los amplificadores paramagnéticos, así como su investigación y aplicación. Esto era natural. Pero lo principal no era eso. Aquí sonaron las trompetas, anunciando que los radiofísicos habían penetrado en el patrimonio secular de los ópticos.

Después de la conferencia, muchos laboratorios comenzaron a trabajar con una temática nueva. Los radiofísicos abordaban los problemas ópticos desde sus posiciones y los resultados no tardaron en aparecer.

A principios de 1960, en la revista londinense "Nature" apareció una información muy concisa de T. Maiman, en la que comunicaba que había creado un generador de ondas luminosas. Un generador nuevo de principio.

Al laboratorio de Maiman comenzó la peregrinación. Allí se encontraba un aparato, nada remarcable a primera vista. Pero los visitantes no podían apartar la vista de una pequeña caja, en cuya tapa superior había un cilindro metálico del tamaño de una lata de conserva de a litro. En el centro de la parte lateral se veía un pequeño agujero.

Después de breves explicaciones, Maiman apretaba un botón montado en el cuerpo del aparato. En el medio de la lámina, fijada en la pared del laboratorio, resplandecía por un instante una deslumbrante manchita de color rojo vivo.

Pero los que estaban atentos, mirando al aparato, y no a la pared, podían observar cómo del agujero, situado en la parte lateral del ci-

lindro, brotaba un hilo de luz del grosor de un lápiz. Casi sin ensancharse, este rayo chocaba contra la pared, torminando en una deslumbrante mancha redonda. Aunque en la habitación había mucha luz, de todos modos el hilo de luz roja hacía recordar a un rayo de sol que pasa a un local oscuro a través de una rendija en las cortinas.

Después de efectuar varios destellos, el cilindro metálico, generalmente, lo abrían. En él, aparte de dos objetos triviales, no había nada extraordinario. Una lámpara flash espiral, parecida a la que utilizan los fotógrafos, y un cristal transparente, rosado pálido, del tamaño de un cigarrillo. Sus extremidades brillaban como un espejo, y era debido a que estaban cubiertas de una capa especular do plata.

Maiman contó a sus colegas que la varilla de color rosado ostaba hecha de rubí artificial. Un rubí igual, pero más claro, se utilizaba en los másores para amplificar las ondas radioeléctricas.

En la absorción de la luz no participa todo el matorial que forma el cristal, sino únicamente los iones de cromo, los cuales tan sólo constituyen parte de un por ciento. Pero son precisamente ellos los que juegan el papel primordial en ol trabajo del aparato. Las propiedados del rubí fueron estudiadas detalladamente durante la elaboración del máser. Irradiándolo con una onda radioeléctrica, se puede obligar a los iones de cromo a amplificar la onda radioeléctrica.

Maiman fue el primero en darse cuenta de quo al irradiar el rubí con la luz de la lámpara flash, so le puede obligar a que amplifique la luz. La experiencia adquirida con los máseres, más los artículos de Townes (es posiblo que haya leído

también los artículos de Básov y Prójorov) le decían que utilizando la reacción puede convertir el amplificador en generador, en un generador de luz que funcionase igual que un radiotransmisor corriente. Se sabía también qué resonador podía utilizarse al trabajar con la luz: un par de espejos paralelos. Lo más sencillo es pulir los extremos de la varilla de rubí y cubrirlos con una capa especular de plata.

El nuevo aparato se parecía tanto al máser, que Maiman sólo cambió una letra en el nombre, transformando el máser en láser. El sabio señalaba: "Esto es así debido a que el principio de funcionamiento de ambos aparatos es igual. Se distinguen solamente las gamas de la longitud de ondas, en las que ellos trabajan. La letra "l" es la abreviación de la palabra "light" (luz). Las demás letras significan "amplificación mediante emisión estimulada de radiaciones".

Las fuentes de luz en el aparato de Maiman, igual que en el máser, las constituían billones de electrones que formaban parte de los iones de cromo dispersos por el grosor de la varilla de rubí. Y todos estos electrones emitían luz, pero no independientemente, no de una manera caótica o espontánea. La emitían de un modo más armonioso que el sonido de los violines en una buena orquesta.

Los ópticos denominan coherencia a esta coincidencia de las principales características de las ondas luminosas. Casi todos los asombrosos logros del láser están relacionados de una forma o de otra con la coherencia, con el hecho de que la emisión estimulada de partículas aisladas, como consecuencia de la reacción, resulta estar muy ligada y toda la masa del medio activo genera como un todo único.

Antes de aparecer el aparato de Maiman, los ópticos casi siempre habían tratado con la luz incoherente. El aparato de Maiman demostró por primera vez que también en la óptica una colectividad armonizada adquiere calidad y posibilidades, inaccesibles para un agolpamiento caótico de individualidades.

Los físicos ya antes habían tropezado con la emisión estimulada de ondas electromagnéticas en diapasones centimétricos de microondas. Es allí donde condujo a la estabilidad de los generadores anteriormente inaccesible, a la sensibilidad límite de los receptores.

Ahora ellos comprendieron que la emisión estimulada en la óptica da mejor resultado que una simple amplificación de la luz, de la que hizo referencia Fabrikant en su tesis. La emisión estimulada en la óptica abre camino a una concentración de energía sin precedente, a la transmisión de energía a grandes distancias con pérdidas muy pequeñas, a la creación de nuevos sistemas de comunicación... Por lo demás, podían abrirse tales posibilidades, con las que no ha soñado nadie todavía.

2ª PARTE

LOS CREADORES

CAPITULO I

IMPULSO GIGANTE

Grano de Sol

El mono lanza el coco de la cima del cocotero y se apresura a bajar del árbol para saciarse con la pulpa del fruto. Este animal comprendió la relación elemental que existe entre la causa y el efecto, entre el objetivo y el modo de lograrlo. Sabe que no es capaz de aplastar ni de cascar este coco. Por eso aprendió a valerse de la fuerza de gravedad.

El hombre no es más fuerte que los monos superiores. Pero es más inteligente. Empezó a utilizar y después a preparar los instrumentos. El hombre pone el coco sobre una piedra y lo parte golpeando con otra piedra. El mono no puede llegar a comprender que el golpe de la piedra sobre el coco sustituye a la caída de este fruto sobre una piedra. En cambio, el hombre comprendió que ejerciendo una simple presión, incluso con una piedra pesada, no es tanto el efecto como el que resulta dando un golpe fuerte con un objeto más ligero.

¡Cuántos siglos hubieron de pasar para que estas simples consideraciones condujesen a la mecánica de Aristóteles y más tarde al principio de la relatividad! ¡Qué diversas fueron las consecuencias que acarrearon los primeros golpes de las piedras sobre los cocos y de las mazas sobre los cráneos de los animales salvajes! El martillo del antiguo herrero desempeñaba las mismas funciones que desempeña hoy día el martillo en un taller de forja moderno. El martillador, al elevar el martillo, le transmite la energía de sus

músculos, para dejarlo caer con velocidad acelerada sobre el tocho. El enorme impulso acumulado por el martillo levantado deforma el tocho en un abrir y cerrar de ojos, convirtiéndolo poco a poco de un lingote rústico en una reja de arado o en un eje de carro. Los más perfectos martillos neumáticos o eléctricos desempeñan el mismo papel: acumulan la energía de una fuente relativamente poco potente, para arrojarla en el momento necesario en forma de impulso demoledor.

Cada vez que el hombre dominaba alguna clase nueva de energía, procuraba hallar la posibilidad de acumularla para liberarla después instantáneamente. Así ocurrió también con la electricidad. En 1745, un tal Musschenbroek, de la ciudad holandesa de Leiden, construyó un recipiente para acumular electricidad, que sorprendía a todos los vecinos con sus brillantes y detonantes descargas. En aquel entonces, a todos les parecía que el rayo había sido subyugado y que pronto prestaría servicio a la gente.

Pero en nuestros días, cuando las chispas eléctricas labran aleaciones duras y trabajan de modo invisible en los motores de automóviles, el rayo sigue siendo un fenómeno terrible y peligroso de la naturaleza, mientras que las botellas de Leiden pueden verse solamente en los gabinetes físicos de las escuelas. Estas fueron sustituidas por diversos condensadores, sin los cuales serían inconcebibles el radiorreceptor, el televisor, el faro moderno y el ayudante del fotógrafo, la lámpara flash (relámpago). La energía eléctrica, acumulada en forma de carga del condensador, puede liberarse en intervalos de tiempo muy cortos, engendrando vivos fucilazos

en las lámparas de señales de los aviones modernos.

Las lámparas de impulsos, rellenas con gas inerte de xenón y las baterías de condensadores que acumulan energía eléctrica para alimentar estas lámparas son ahora elementos imprescindibles para la mayoría de los láseres que utilizan cristales, vidrio y líquidos en calidad de material activo, capaz de generar los destellos de luz coherente.

Precisamente los láseres fueron los que permitieron a los científicos lograr la mayor concentración de energía. La energía se concentra en haces luminosos enormemente potentes, comprimidos hasta dimensiones que no superan ni un micrón. La historia de la lucha por potencias superaltas es interesante no solamente de por sí, sino también como el preludio a un futuro no menos apasionante. Los impulsos superpotentes lumínicos, en el sentido directo y en el figurado, iluminan una de las vías más prometedoras hacia el dominio de la energía de la síntesis termonuclear. Es posible que el hombre conquiste así, precisamente, las inagotables fuentes de energía nuclear, conservando el carbón y el petróleo, la turba y la madera de su exterminio en los hornos.

Los físicos saben que para que dos núcleos de hidrógeno pesado—deuterio— se fusionen el uno con el otro, formando el núcleo de helio y liberando una porción de energía, deben chocarse entre sí a gran velocidad. Sólo en este caso pueden ser superadas las fuerzas de repulsión mutua de las cargas homónimas de los núcleos. Las fuerzas que defienden el núcleo de sus semejantes, son más fuertes que las armaduras de los caballeros medievales. Para comunicar a los núcleos

de deuterio la velocidad necesaria, es preciso calentarlos hasta una temperatura de varias decenas de millones de grados. Pero esto no es bastante, pues es imposible dirigir con gran precisión un núcleo contra otro para que choquen obligatoriamente entre sí. La colisión es una casualidad. Y para que estas casualidades se realicen en la cantidad suficiente es menester retener durante cierto tiempo el gas candente en volumen limitado, a pesar de las enormes velocidades que le obligan a dispersarse en el espacio.

Así, pues, calentándolo y reteniéndolo. Mas, ¿cómo calentarlo y retenerlo? El primer camino, esperanzador por cierto, lo indicó el académico I. E. Tamm: calentarlo con una descarga eléctrica y retenerlo con la fuerza de los campos magnéticos. Este camino despertó el interés de muchos hombres de ciencia. Sin embargo, nadie lo recorrió hasta el final; nadie ha alcanzado aún el objetivo anheloso.

El motivo principal consiste en que mediante la descarga eléctrica es imposible efectuar un calentamiento bastante rápido. Y hoy, incluso, la potente trampa magnética no es capaz de retener al plasma de la dilatación, cuando su temperatura supera un millón de grados... La competición entre las propiedades naturales de los átomos y los ardides de la gente no concluye a favor de la última. El movimiento térmico, que tiende a dispersar los átomos, por ahora prevalece sobre las fuerzas de retención de la trampa y sobre la capacidad de la potente descarga eléctrica de continuar calentando el plasma que se difunde rápidamente.

Por ahora, no se ha logrado acelerar hasta la magnitud necesaria el proceso de calentamiento

ni aumentar el tiempo preciso para retener el plasma, aunque los experimentos de los científicos soviéticos, dirigidos por los académicos L. A. Artsimóvich y M. A. Leontóvich, efectuados en instalaciones del tipo "Tokamak", los haya situado en el mismo umbral del objetivo planteado.

He aquí también otro camino. En la cámara de vacío se dispara un pequeño témpano de deuterio congelado. Un potente destello del láser se encuentra con el témpano en el centro de la cámara. La potencia del rayo de láser es tan alta, que el témpano, cuya temperatura al inicio era muy próxima al cero absoluto, se convierte repentinamente en un granito de Sol. Su temperatura se asemeja a la que se desencadena en las entrañas de la estrella, en cambio, su densidad sigue siendo aún muy alta. Pues en el instante que dura el destello, a las partículas que ya habían cogido una velocidad enorme ni siquiera les da tiempo de desplazarse en el espacio.

En esta temperatura infernal se rompe la relación entre los núcleos y los electrones. Los átomos de deuterio dejan de existir. Arde el plasma de los núcleos de deuterio —los deuterones— y los electrones libres. Al chocar entre sí, los deuterones forman núcleos de helio. La temperatura, en este caso, aumenta más aún. Las reacciones acompañantes engendran neutrones libres. Varios instantes más y la estrellita —hechura del hombre— se apaga. El plasma, al enfriarse rápidamente, se esparce por la cámara de vacío.

Mientras tanto, los científicos han de pasar muchas horas más observando las indicaciones de los aparatos. Durante largos meses estarán

pensando cómo preparar el siguiente experimento, cómo dar el siguiente paso para dominar la energía de los núcleos atómicos.

Y cada uno de estos experimentos afiligranados requiere una aplicación simultánea de los logros más relevantes de la ciencia moderna: ingeniería criogénica, alto vacío y láseres superpotentes, así como aparatos automáticos no menos complejos que aquellos que dirigen al proyectil antiaéreo contra el avión supersónico.

Acerca de cada una de estas ramas puede escribirse un libro entero, mas el nuestro trata del láser. Por eso aquí vamos a explicar cómo surgieron y trabajan los láseres, capaces de encender una estrella artificial; láseres que engendran impulsos de luz gigantescos por su potencia.

Lo principal es que haya un hecho

El primer láser, igual que la primera locomotora, era muy imperfecto. Convertía en luz, aproximadamente, cinco centésimas de por ciento de la energía acumulada en los condensadores que alimentan la lámpara flash. Esto, naturalmente, era una potencia despreciable. Mas, de todos modos, la radiación de los primeros láseres poseía ya propiedades magníficas. A diferencia de la luz de las lámparas corrientes, luz que se dispersaba hacia todos los lados, ésta formaba un haz estrecho y concentrado. Al salir del láser, el haz tenía, aproximadamente, un centímetro de diámetro, aumentando hasta dos centímetros a la distancia de un metro. La energía del destello era igual a un julio. Esa misma energía, aproximadamente, la emite en un segundo la lámpara de una linterna de bolsillo de un vatio de potencia. Mas el láser emitía esta

energía en tan sólo una milésima parte de segundo. Para poder emitir un julio en una milésima de segundo, se necesita una lámpara que tenga una potencia de un kilovatio. Además la lámpara corriente no es capaz de formar un haz estrecho. Es imposible reunir en un haz, semejante al rayo del láser, toda la luz emitida por la lámpara.

Varios años después de aparecer los primeros láseres, aumentaron extraordinariamente las posibilidades de los nuevos aparatos. Aumentando las dimensiones y mejorando la calidad de los rubís artificiales, se incrementó la energía del destello del láser hasta centenas de julios. Al emplear en los láseres un vidrio especial, que contiene iones de neodimio, elemento del grupo de tierras raras, se logró obtener energías más altas aún. El láser de neodimio puede producir centellos con energía de muchos kilojulios.

Tal incremento de energía ha permetido utilizar los láseres con fines tecnológicos en la industria, la medición de distancias en la geodesía y la astronomía, el tratamiento de enfermos y, claro está, en los trabajos de investigación. Las nuevas posibilidades y los seductores objetivos exigían el incremento ulterior de la potencia del láser.

Pero aumentar la potencia de la radiación láser, aumentando simplemente la energía de los destellos del láser aislados se hacía cada vez más difícil. A la industria, prácticamente, le era ya imposible aumentar más el tamaño de las varillas de rubí. Resultaba mucho más fácil fabricar grandes elementos activos de vidrio de neodimio; sin embargo, también aquí cada paso que se daba en esta dirección exigía esfuerzos enormes y grandes gastos.

Alcanzaron también su límite práctico las lámparas de impulsos emitentes de luz que excita el elemento activo del láser.

Quedaba la posibilidad de aumentar la potencia del destello del láser, reduciendo la duración de su impulso, pero teniendo la misma energía. Mas para esto era menester aumentar también la potencia de las lámparas de bombeo por impulsos, lo que, a su vez, puede lograrse solamente reduciendo la duración de su destello. No obstante, este método no resultó real debido a que las lámparas de bombeo se destruían rápidamente.

R. Hellwarth indicó un camino totalmente nuevo al año de aparecer el primer láser. Su idea fue la consecuencia del análisis crítico del proceso de generación del láser, cuyo elemento activo era el cristal o vidrio, estimulados por la luz de una lámpara de bombeo. Resulta que el impulso de luz, emitido por semejante láser, tiene, generalmente, una estructura compleja.

En la mayoría de los casos, cada brote del láser no consta de un impulso monolítico, sino de muchísimos brotes aislados, picos que apenas duran algunas millonésimas partes de segundo. Estos picos van caóticamente uno tras otro con intervalos equivalentes también a millonésimas partes de segundo.

¿Por qué surge un cuadro tan complejo?

Esta pregunta preocupaba mucho a los físicos, pues comprendían que así la potencia del láser se dividía en porciones débiles y pequeñas.

Para combatir un fenómeno hay que comprenderlo. ¿Qué ocurre por fin en el cristal o en el vidrio durante la generación? Una vez más los físicos apreciaban mentalmente cada detalle

del láser. Mas todo era conocido, todo habíase palpado miles de veces...

En estado habitual, los iones activos, que aseguran el trabajo del láser — los iones de cromo en el rubí o los iones de neodimio en el vidrio — se encuentran en estado energético fundamental. Todo el elemento activo se encuentra en equilibrio térmico con el medio ambiente.

¿Y lo que sucede después de comenzar el destello de la lámpara de bombeo por impulsos? Los iones activos absorben esta luz y poco a poco, aumentando en cantidad, pasan al estado de excitación.

Todo esto era también muy conocido. Igualmente era sabido que tan pronto el número de iones excitados alcanza una magnitud determinada, llamada umbral de excitación, en el láser comienza la generación: el crecimiento del número de fotones en forma de avalancha. Esta generación se debe a la transición activa de la masa de iones excitados al estado fundamental. Nada más que la cantidad de iones activos, como consecuencia de la emisión de fotones, sea insuficiente para mantener la generación, ésta cesa. Sólo por influencia de la luz de una lámpara de bombeo será posible aumentar otra vez el número de iones activos. Tan pronto se haya alcanzado el umbral de generación, surge la emisión del pico siguiente, y así sucesivamente, hasta que se apague el destello de la lámpara de bombeo.

Los científicos durante mucho tiempo trataron de forzar el régimen de la lámpara de bombeo. Mas, aumentando la energía de la lámpara de bombeo, lograban únicamente aumentar la cantidad de picos aislados, pero no la potencia de cada uno de ellos.

¿Y si intentáramos cambiar el propio proceso de generación?

Hellwarth se decidió a lograr el objetivo, consiguiendo el aumento del número de iones excitados en el momento del comienzo de la generación, elevando el umbral de excitación del láser. El científico sabía que la magnitud del umbral de excitación dependía de muchos factores y, ante todo, de las propiedades de los iones activos, de la longitud del elemento activo y de la capacidad reflectora de los espejos. Precisamente de esas características del láser depende también la potencia de cada pico. El comprendía que el método más simple era reducir el coeficiento de reflexión en uno de los espejos. En este caso, efectivamente, antes de empezar a generar el láser, en el elemento activo debe acumularse un número de iones excitados mayor que en el caso en que ambos espejos reflejan bien.

Pero con acumular una energía grande para el comienzo de la generación no es bastante para que ésta se convierta totalmente en la emisión del láser. El bajo coeficiente de reflexión del espejo de salida no sólo aumenta el umbral después del cual comienza la generación, sino que provoca su cese al haber mayor reserva de energía desexcitada. Así pues, el camino simple conduce a un callejón sin salida.

Pero Hellwarth encontró la salida. Es necesario, decía él, saber cambiar rápidamente la capacidad reflectora del espejo. Que sea peor antes del comienzo de la generación y mejor después de haber empezado la generación. Puede taparse el espejo con un obturador no reflector y luego, en el momento oportuno, abrirlo. Antes de que empiecen a trabajar las lámparas de bombeo, se desvía el espejo de la posición correcta,

volviéndolo a su posición anterior solamente cuando en el elemento activo se haya acumulado la suficiente cantidad de iones excitados.

En los primeros experimentos los resultados superaron ya todas las esperanzas. Entre la barra de salida y el espejo pusieron un obturador que se abría en el momento cuando la energía, acumulada en el elemento activo, alcanzaba el máximo. No se sabe si Hellwarth esperaba ver lo que ocurrió en el momento de abrir el obturador.

Aquí no había nada que se pareciese al trabajo habitual del láser. Toda la energía acumulada en la barra activa se derramó en un solo impulso de radiación. Hellwarth lo denominó gigante. ¡La potencia de emisión en el impulso superaba los diez millones de vatios! Era extraordinaria también la duración del impulso. Apenas se prolongaba unas cuantas cienmillonésimas de segundo. Y eso que sólo era un impulso. Los picos caóticos no aparecían. Había cambiado radicalmente todo el proceso de la generación.

Las condiciones del juego

Un conocido mío, físico de profesión, dice en casos como éste: "Lo importante es el hecho, la explicación se encontrará".

He aquí cómo explicó el afortunado Hellwarth a sus colegas el surgimiento del enorme impulso en el láser:

"Para que se produzca la generación del láser es necesaria la presencia simultánea de dos factores: el que el elemento activo esté excitado y el que el resonador garantice una reacción bastante fuerte, para poder lograr, con nivel accesible de excitación, el umbral de autoexcita-

ción. Aquí, el radioaficionado verá mucho común con las condiciones de la autoexcitación de un simple oscilador de lámparas. La barra activa excitada, a semejanza de la lámpara de radio, suministra energía al generador. Los espejos que forman el resonador óptico, lo mismo que la bobina de reacción, obligan a las ondas electromagnéticas a circular reiteradamente en el sistema; además, cada ciclo cerrado va acompañado de la amplificación, el aumento de la energía de onda.

En el caso del láser, teniendo en cuenta la energía de onda electromagnética, es más cómodo hablar del número de fotones que pasan por la sección de la barra activa. Si las condiciones de la autoexcitación han sido cumplidas, entonces, cada vez que se hace un vuelo a través de la barra, se produce un aumento del número de fotones en forma de avalancha. Es importante señalar que la velocidad de desarrollo de esta avalancha no es constante, sino que incrementa a medida que va aumentando el número de fotones. Einstein, anteriormente, había determinado esto con las palabras siguientes: la probabilidad de la emisión del fotón por influencia de la onda luminosa es proporcional a la densidad de la energía en esta onda. Mas, expresándose uno con la terminología que usan los ingenieros de radio, ésta puede apreciarse, hablando de la calidad del resonador óptico, mediante el concepto del factor de calidad. Un buen resonador posee alto factor de calidad; un resonador malo posee bajo factor de calidad. Si el resonador está formado por dos espejos buenos, su factor de calidad será alto. Obturen uno de los espejos y el resonador dejará de existir, su factor de calidad descenderá hasta cero, cesará la reacción

en el lásor. De este modo, no llega a producirse la generación.

Así, pues —seguía desarrollando Hellwarth su idea—, si el lásor funciona en el régimen habitual, sin controlar el factor de calidad, él genera una serie de picos caóticos, cuyo conjunto forma el impulso del láser. Antes del comienzo de cada pico, la excitación del elemento activo apenas supera el valor del umbral. Pero también al final de este pico la excitación del elemento activo sólo desciende un poco más abajo del umbral. Mediante una acción ininterrumpida de la lámpara de bombeo, se crean condiciones para que surja un pico nuevo. Y así, hasta que la lámpara de bombeo no agote la energía acumulada en los condensadores.

A diferencia del régimen de generación libre, que acabamos de describir, en el régimen de dirección del factor de calidad, el elemento activo acumula en sí gran cantidad de energía. En el momento de conectar el pleno factor de calidad del resonador, el umbral de la autoexcitación resulta superado en varias veces. En este caso, la avalancha de autoexcitación se desarrolla de manera tan rápida y tan intensa, que en un solo impulso se desexcita, en realidad, toda la energía acumulada en el elemento. Su excitación no se reduce hasta el valor de umbral, sino hasta cero, prácticamente. El elemento suelta de repente toda la energía que ha acumulado en el proceso del bombeo. Y esto es todo. Les he expuesto las condiciones del juego. El juego en un impulso gigante".

Los científicos de muchos países se incluyeron en este juego. Después de realizar Hellwarth el trabajo de pionero, los científicos comenzaron a perfeccionar los métodos de generación de

impulsos gigantes. El trabajo se desarrollaba en dos direcciones: una, la perfección de los métodos de control del factor de calidad; otra, la elaboración de materiales y estructuras, capaces de acumular gran cantidad de energía que ingresa de las lámparas de bombeo.

Se propusieron y examinaron muchos métodos distintos de control del factor de calidad, mas sólo tres resultaron viables. Unicamente éstos pudieron simultanear la acción rápida, la fiabilidad y la pequeña pérdida de energía en el propio sistema de control.

Es difícil decir ahora quién propuso el sistema más simple y lo suficientemente eficaz con prisma giratoria, pero sí era una construcción elegante y fácil de realizar. En ella, el prisma de vidrio, con dos aristas perpendiculares e iguales entre sí, sustituye a uno de los espejos. El prisma gira por medio de un pequeño motor a la velocidad de varias decenas de miles de revoluciones por minuto. La generación surge después de conectar las lámparas de bombeo, en el momento cuando la arista delantera del prisma se pone, por primera vez, perpendicular al eje del resonador. Por lo general, el encendido de las lámparas de bombeo se efectúa automáticamente y está relacionado con la posición del prisma giratorio. Esto asegura una reproducción bastante buena de las condiciones de generación y, por tanto, aumenta la energía de los impulsos gigantes.

Dicho sistema apareció en seguida en muchos laboratorios y conquistó con su accesibilidad la simpatía de los científicos que trabajaban con el láser. Pero, al poco tiempo, se descubrió algo así como un "defecto congénito". Resultó ser limitada la velocidad de paso del factor de cali-

dad bajo del resonador al factor de calidad alto. Y no se podía hacer nada, puesto que los prismas van ocupando tan sólo poco a poco la posición debida. Tampoco son abarcadas simultáneamente todas las secciones del elemento activo por el proceso de generación. Parecía que era posible reducir estas insuficiencias aumentando la velocidad de rotación. Se hizo la prueba, sin embargo, poco más tarde se agotaron todas las posibilidades. El defecto era insuperable. El límite se determina por la resistencia de los materiales, incapaces de oponerse a las enormes fuerzas centrífugas. Hubo que suspender las búsquedas en esta dirección y acelerar la elaboración de otros sistemas.

Al poco tiempo, aparecieron en las revistas científicas referencias acerca del obturador eléctrico. Quienes lo habían empleado escribían que éste carecía de las deficiencias del sistema del prisma giratorio. Pasando del estado cerrado al abierto por la acción del impulso eléctrico, el paso se efectúa, por tanto, en tan sólo unas cienmillonésimas de segundo. Además, la conmutación se produce simultáneamente en toda la sección del obturador. No obstante, los autores de este método no ocultaban que la deficiencia del obturador consiste en la incompleta clarificación. Incluso estando abierto, las pérdidas en él no bajan hasta cero. He aquí por qué fue necesario buscar otro método, es decir, el tercero...

El poema de la materia y la energía

Sería un error decir que todos los científicos que se dedicaban al láser esperaban con los brazos cruzados los futuros éxitos en el camino de la obtención del impulso gigante. Claro que no.

A muchos les bastaban las potencias alcanzadas y se valían con entusiasmo de ellas para realizar sus investigaciones científicas inmediatas. Por eso dejemos a un lado por un tiempo a esos físicos que desean encontrar el tercer método, y cuando lo hayan conseguido volveremos a tratar de ellos. Mientras tanto, vamos a interesarnos por los resultados a los que condujeron los dos primeros métodos.

La creación de láseres capaces de generar impulsos gigantes de radiación no sólo dio un estímulo enorme al desarrollo ulterior de la técnica del láser, sino fue también un gran incentivo que descubrió perspectivas inesperadas en otras ramas y condujo al surgimiento de nuevas direcciones científicas.

Una de ellas fue la óptica no lineal. Ya en la era de antes del láser, el notable óptico, académico S. I. Vavílov, había previsto que las propiedades del elemento deben modificarse bajo la influencia de una luz de gran intensidad. En este caso, se complican las ecuaciones que describen la propagación de la luz. Se transforman en ecuaciones no lineales. De ahí viene el nombre de la nueva rama de la óptica. Mas antes de la creación de los láseres no se logró producir fuentes de luz cuya potencia permitiera efectuar directamente los experimentos correspondientes. A pesar de todo, la profunda intuición física le permitió a Vavílov hallar el único camino por el que el experimentador podría penetrar en el dominio inaccesible de la óptica no lineal. Este camino estaba basado en el empleo de los fenómenos de resonancia.

Existen muchos ejemplos cuando una fuerza débil, al actuar en resonancia, provoca un incremento gradual de oscilaciones que alcanzan

gran intensidad, a veces destructora. Así ocurrió con un destacamento de soldados que destruyó uno de los puentes de Petersburgo solamente porque, al marcar el paso, coincidió por casualidad en resonancia con las propias oscilaciones del puente.

Las investigaciones sistemáticas condujeron al éxito. Al observar al absorción de la luz en las zonas de las rayas espectrales de algunas moléculas, Vavílov y sus colaboradores descubrieron que la magnitud de absorción disminuye a medida que aumenta la intensidad de la luz incidente. El medio se "aclaraba" en plena concordancia con el pronóstico. ¿Quién podría esperar que más tarde saldría de aquí el obturador para la modulación del factor de calidad de los láseres, aquel tercer método que permitía aumentar la potencia de impulso del láser, del que acabamos de ponernos de acuerdo de no hablar por ahora?

Así lo haremos por un tiempo, hasta enterarnos de la aportación del láser a la óptica no lineal y de si éste ha justificado el pronóstico de Vavílov.

En su magnífico libro "La microestructura de la luz", Vavílov, a la par con este experimento, examina las causas por las que otras características de la materia deben depender también de la intensidad de la luz. Aquí describe cómo deben transcurrir los fenómenos correspondientes, augurando el futuro desarrollo de la ciencia.

Había comenzado el año de 1961, al que podemos considerar como el inicio de la etapa moderna del desarrollo de la óptica no lineal. La abrieron los experimentos de P. Francken y sus colaboradores, quienes observaron a mediados de 1961 cómo surgía una luminiscencia débil de



color violeta al pasar el rayo de láser a rubí a través de un cristal transparente.

Esto era un proceso no linoal típico: la duplicación de frecuoncia de las oscilaciones. Naturalmento, este experimento fue interpretado como sensacional. Ahora, cuando existen láseres con factor de calidad controlado, semojante experimento puede realizarse en cualquier laboratorio y servir de práctica do laboratorio para los estudiantes.

En la Universidad de Moscú, S. A. Ajmánov y R. V. Jojlov analizaron los experimentos de Franckon y, basándose en la profunda comprensión de la naturaleza de los procesos ondulatorios y la teoría no lineal de las oscilaciones, establecieron qué había que hacer para que la multiplicación de frecuencia en la óptica fuese tan eficaz como en el radiodiapasón. Ellos demostraron que era menester crear condiciones especiales, en las que fuesen iguales las velocidades de la onda principal, estimulada por el impulso gigante del láser, y de la onda de frecuencia duplicada (o triplicada), que surge en la materia. Y ellos realizaron sus predicciones.

Crean también un nuevo tipo de láser — el generador paramétrico de luz — que, en realidad, representa un convertidor de frecuencia que transforma el impulso gigante de la emisión del láser en radiación cuya frecuencia puede tomar, según el deseo del experimentador, cualquier valor en el ancho diapasón de las ondas luminosas. Pero con esto no se limitaban aquellas nuevas verdades que había logrado el láser en la rama de la óptica no lineal.

La óptica no lineal está ligada estrechamente con el fenómeno de la dispersión de la luz en las ondas acústicas: con la llamada dispersión de Mandelshtam y Brillouin; con la dispersión de combinación, descubierta simultáneamente por Mandelshtam y Landsberg en la Unión Soviética y por Raman y Krishnan en la India. Los impulsos gigantes de luz, emitidos por láseres con factor de calidad controlado, dieron a estos y a otros fenómenos similares gran importancia práctica. Por ejemplo, la dispersión de combinación estimulada del impulso gigante de luz permitió crear un nuevo tipo de láser. La dispersión esti-

mulada de Mandelshtam y Brillouin en el régimen de impulsos gigantes, según habían señalado Prójorov y su colega F. V. Bunkin, debe limitar las posibilidades de los láseres de cuerpos sólidos, acarreando la autodestrucción del elemento activo.

Básov y Krojin, por lo visto, fueron los primeros en señalar la posibilidad de utilizar impulsos gigantes para calentar, por medio del láser, el plasma, como el camino que conduce a las reacciones termonucleares controladas. En el Instituto de Física P. N. Lébedev, los científicos Básov y Prójorov, junto con sus colaboradores, casi simultáneamente dieron el paso hacia el campo de temperaturas superiores a un millón de grados y observaron la aparición de neutrones libres.

No obstante, resultó insuficiente emplear el láser con factor de calidad controlado. El impulso gigante, producido por el láser, hubo que intensificarlo más. Esta fue una labor fascinante que condujo a resultados en sumo grado asombrosos.

Aquí están enumeradas solamente algunas consecuencias relacionadas con el empleo de los impulsos gigantes de la luz del láser. Este trabajo ofrece tantas perspectivas, que cada vez absorbe en su órbita mayor número de laboratorios y colectividades.

La penetración de la luz del láser en la profundidad de la materia revela tales propiedades recónditas de la misma, tales particularidades de la propia luz, desconocidas hasta el momento, que tal vez pueda decirse que comienza una nueva página de la física, un nuevo poema de la materia y la energía. Acerca de esto trataremos más adelante. Mientras tanto, es hora ya de saber

cómo transcurren las cosas relacionadas con el aumento de la potencia del impulso gigante. Este es el momento más oportuno, puesto que le esperan, como ya sabemos, problemas interesantísimos.

El tercer método

Imagínese un pequeño y estrecho recipiento do cristal o do cuarzo. Entre las paredes planas del recipionte hay liquido: una solución do un colorante químico. Este coloranto se distingue en que absorbe fuertemente la emisión del láser, y en esto instante pierde su color, haciéndose transparente. Este proceso se asemeja mucho al proceso del que padecían las lechuginas y los fabricantes de telas baratas, debido a que las telas se decoloraban rápidamente bajo los rayos de sol.

En el caso dado, esta particularidad sirvió de base para la dirección de la generación del láser. El llamado obturador no lineal. Ese mismo tercer método, del que queríamos saber.

Si ponemos el recipiente con ese colorante delante do uno de los espejos del resonador del láser, el espejo quedará cerrado. El factor de calidad del resonador baja hasta cero. La reacción no puede realizarse. Da la impresión de que no va a empozar la generación, aun por muy fuerte que esté excitado el elemento activo. Pero esto no es así. Habiendo un nivel grande de excitación, la capacidad amplificadora del elemento activo llega a ser muy considerable. Incluso varios fotones, emitidos casualmente por los iones activos a lo largo de la barra del láser, en un solo recorrido en dirección del recipiente con el colorante provocan la aparición de tal número

de fotones estimulados, que su absorción en el colorante origina una notable decoloración y clarificación del mismo.

Como resultado, una parte de los fotones pasan al espejo a través del obturador entreabierto y vuelven al elemento activo. Así es cómo empieza a accionar la reacción, lo cual significa que surge la autoexcitación del láser. La velocidad de desarrollo del proceso resulta muy alta, puesto que la multiplicación de los fotones en avalancha en el elemento activo provoca también una clarificación del colorante en forma de avalancha; por consiguiente, se amplía la reacción. Así nace el impulso gigante.

La ambición por alcanzar una potencia aún mayor de los impulsos del láser, por reducir más su duración, obligó a los científicos a estudiar atentamente el proceso de surgimiento y desarrollo de los impulsos gigantes.

Los esfuerzos de Básov, Letójov y sus colaboradores fueron coronados con esencial éxito. Posiblemente que Letójov fuera el primero en destacar el papel que desempeñan las fluctuaciones en el engendramiento y desarrollo del impulso gigante.

Tan pronto que la radiación de bombeo asegure la suficiente excitación del elemento activo, los fotones aislados, emitidos por iones excitados, según las leyes de la casualidad, provocarán diminutas microavalanchas independientes. La mayoría de ellas interrumpe su desarrollo en el límite del elemento activo o al encontrarse con el obturador. Basta con que se abra un poquito el obturador para que un sinnúmero de microavalanchas, que acaban de surgir y que vuelan en dirección favorable, inicien el proceso de autoexcitación, aunque al principio su inten-

sidad puede distinguirse decenas de veces.

El experimento dio un resultado inesperado: el impulso gigante no era liso, como parecía antes. ¡Estaba compuesto de todo un conjunto de impulsos más cortos aún! ¿Qué es esto? ¿Un movimiento circular? ¿Una zancadilla que ponía la luz a los científicos por haber insistido tanto tiempo en conquistarla?

Hollwarth había disciplinado ya los famosos picos y los había unificado en un potente impulso monolítico. Ahora la atención de los científicos estaba concentrada solamente en el problema de aumentar su potencia. Y lograron enormos éxitos. Aumentaron la potencia y parecía que había terminado una de las etapas más laboriosas del trabajo. ¿Y qué resultaba? ¿Comenzar de nuevo? ¿Es que llegaron al mismo punto, de donde iniciaron su difícil movimiento?

Sólo meticulosas investigaciones, meditaciones y disputas ayudaron a comprender que lo ocurrido no era ningún error ni fracaso.

Comenzaba la siguiente vuelta de la espiral del saber.

CAPITULO II

MAS VELOZ QUE LO VELOZ, MAS CORTO QUE LO CORTO

De nuevo un impulso gigante

Al hombre le atrae lo que no ha alcanzado todavía. Al alpinista, la cima indómita; al agrónomo, la cosecha nunca vista; al aviador, chófer, marinero, corredor, nadador, diseñador de computadoras o creador de máquinas herramientas, la velocidad. Son muchos, muchísimos, los que tienden a alcanzar velocidades inauditas. Mas, sólo en un caso, tal vez, la velocidad fantástica surgió como obsequio al hombre que trataba de lograr otro objetivo totalmente distinto.

La amplia aplicación del láser requiere cada vez más concentración de energía en espacio y tiempo. No obstante, en la naturaleza existe toda una serie de prohibiciones, muy próximas al famoso principio de indeterminación, descubierto por Heisenberg, uno de los fundadores de la mecánica cuántica. Tal prohibición limita también la posibilidad de la concentración espacial, es decir, del enfoque de la luz de láser en una manchita, cuyas dimensiones son considerablemente menores que la longitud de la onda irradiada.

Pero en el primer láser a rubí la concentración de energía en tiempo estaba muy lejos aún del límite. Este láser, digamos de pasada, como la mayoría de los láseres de funcionamiento por impulso modernos, emitía una serie de impulsos que seguían unos a los otros de manera caótica con duración de cerca de una millonésima parte

de segundo cada uno. El destello del láser se componía de cientos de estos picos aislados y duraba, aproximadamente, una milésima parte de segundo. Muchos intentaron comprender por qué la generación del láser no se desarrollaba de manera ininterrumpida, sino que se cortaba rápidamente, para comenzar de nuevo en forma del pico consecutivo. Nada semejante a esto se observaba en los generadores de tubos termoiónicos ni tampoco en los osciladores cuánticos de radiodiapasón: los máseres. Fueron publicadas varias teorías y cada una de ellas explicaba de forma convincente el motivo del surgimiento de los picos, mas todos los motivos eran... distintos. No obstante, todas las teorías se confirmaban bastante bien con los experimentos.

Poco a poco pudo aclararse que el motivo principal eran las dimensiones del resonador. El resonador del láser es, por lo general, millones de veces mayor que la longitud de onda luminosa. Por eso la estructura del campo electromagnético en él es mucho más complicada que en el resonador del máser en el que caben no más de unas cuantas ondas.

En el resonador del láser pueden surgir muchos modos de oscilación distintos, que no son equitativos entre si. Para unos, el factor de calidad del resonador es mayor, y se excitan mejor que los demás. La desigualdad surge debido a la presencia del elemento activo — rubí, vidrio, etc. — dentro del resonador, así como a consecuencia del ingreso irregular de luz de las lámparas de bombeo en el grosor del elemento activo.

Como resultado, los distintos modos de oscilación comienzan y terminan el proceso de generación casi independientemente unos de los otros,

y después, al cabo de algún tiempo, en ellos surge de nuevo el pico de generación. La energía de cada pico no es grande, pues en su formación participa sólo una pequeña parte de las partículas activas excitadas por la lámpara de bombeo.

El método de concentrar la energía del láser en tiempo, de unificar la mayoría de las partículas activas para la generación de un impulso de radiación y de esta manera aumentar la potencia del láser, fue hallado por Hellwarth. Para esto, propuso gobernar el resonador del láser, o sea, abrir con ayuda de un obturador de acción rápida uno de los espejos del resonador, que en el momento inicial se encuentra cerrado con ese obturador.

Como resultado, el bombeo de las partículas activas dura más que con el espejo abierto. Pues sin el sistema de los dos espejos no hay resonador y es imposible la generación. Al momento de abrirse el obturador, en el resonador se acumulan muchas más partículas activas, que en un láser corriente. La avalancha de generación se desarrolla muy rápida e intensamente, y la radiación del láser se reúne en un impulso gigante que dura algunas cienmillonésimas de segundo. A pesar de que la energía de este impulso es, por lo general, varias veces menor que la energía del destello del láser habitual, compuesto de muchísimos picos, su potencia es mayor en cientas de miles de veces. Pues la potencia caracteriza el valor medio de la energía liberada en una unidad de tiempo, así que, reduciendo el tiempo, aumenta la potencia. Por eso la potencia que desarrolla la pólvora al efectuar un disparo es conmensurable con la potencia de una turbina enorme. Sin embargo, la carga del cartucho,

capaz de empujar a la bala a gran velocidad, no puede realizar tan siquiera una pequeñísima parte del trabajo que puede hacer la incansable turbina. La potencia gigante de los impulsos de los láseres con el resonador controlado permite solucionar muchísimos problemas complicadísimos de la ciencia y la técnica. No obstante, existen casos cuando la potencia alcanzada es insuficiente. Se conocen situaciones también cuando no es tan importante la potencia, como la energía del destello del láser.

El método más directo de incrementar la energía del láser a costa del aumento de las dimensiones del elemento activo, lo cual dio resultado en los láseres que trabajaban en el régimen habitual de generación libre con sus picos caóticos, no daba efecto al pasar al impulso gigante. Las investigaciones demostraron que esto no era casual para el material fundamental del láser: el rubí y el vidrio de neodimio. La causa del fracaso son las mismas particularidades de estos materiales, que aseguran sus méritos excepcionales desde el punto de vista de los láseres corrientes.

El vidrio de neodimio y el rubí pueden acumular en cada uno de sus centímetros cúbicos porciones de energía relativamente grandes. Y son tales las propiedades de los iones del neodimio y del cromo, que la amplificación de la luz en éstos es muy grande al pasar cada centímetro de largo. Merced al gran coeficiente de amplificación, los láseres basados en estos elementos se excitan con bastante facilidad, incluso cuando los espejos son relativamente malos. Si los elementos activos son lo suficientemente largos, uno de los espejos del resonador puede estar ausente por completo, pudiendo sustituirse per-

fectamente por la reflexión de luz desde el extremo del elemento activo.

En este caso, claro está, el régimen del impulso gigante es totalmente irrealizable. La generación comienza estando el obturador cerrado, pese al bajo factor de calidad del resonador, formado por un espejo y el extremo del elemento activo. Los ingenieros salvaron la cosa puliendo el extremo en ángulo hacia el eje del resonador. La generación se hizo imposible con la participación del extremo; la regulación del resonador por medio del obturador situado delante del segundo espejo se ejecutaba sin obstáculo alguno.

Pero las mediciones demostraron que a medida que se alargaba el elemento activo, iban aumentando ineluctablemente también las pérdidas de energía en el régimen del impulso gigante en comparación con la energía de generación libre; lo cual no se lograba eliminar ni en el rubí, ni en el vidrio de neodimio. Al haber altos niveles de excitación, producidos mediante el bombeo con el obturador cerrado, en ellos surgen coeficientes de amplificación extraordinariamente grandes. Tan grandes, que los fotones, que salen volando casualmente a lo largo del eje del elemento activo, provocan en él la emisión estimulada de un gran número de fotones que se llevan buena parte de la energía que ingresa de las lámparas de bombeo al elemento activo. Con esto se limita la posibilidad de acumular en el elemento activo grandes reservas de energía y, por tanto, la posibilidad de aumentar también la energía del impulso gigante.

Así es cómo la naturaleza levantó ante los científicos e ingenieros un obstáculo insuperable. Resultaron agotadas las posibilidades del método de resonador controlado. Hacía falta algo

nuevo. Bien nuevos materiales activos para poder alcanzar mayores energías con el método conocido, o bien métodos nuevos que permitiesen alcanzar lo mismo, pero utilizando el material conocido. La primera variante no se ha realizado aún, pero algunos hombres de ciencia opinan que podrán salir con la suya. La segunda variante ya permitió aumentar varias veces la energía de los impulsos y, al mismo tiempo, condujo a resultados totalmente inesperados.

El viraje

Todo parecía muy sencillo. Si están agotadas las posibilidades de los generadores de impulsos gigantes, es preciso dejar pasar los impulsos emitidos por ellos a través de un amplificador. Está claro que así podremos lograr la amplificación de energía. Pero cuando es muy grande la energía del impulso, que cae en la entrada del amplificador, es de esperar también un efecto complementario. Aquí no había nada nuevo. En las investigaciones anteriores, hechas en uno de los tipos de amplificadores cuánticos del radiodiapasón — el máser de onda progresiva — habíase establecido que la forma del impulso amplificado sufría distorsión cuando las señales de entrada eran grandes.

En el radiodiapasón, donde las señales sirven para transmitir información, cualquier distorsión en el proceso de la amplificación es, desde luego, nociva. Para combatir las distorsiones, los radistas tuvieron que estudiar las causas de su surgimiento. Y establecieron que, a medida que se propaga el impulso a través de un medio activo la señal incluida en su parte delantera, sobre todo en el frente del impulso, va amplián-

dose cada vez más, quitándoles energía a las partículas activas del medio.

Si la señal ya era muy fuerte antes de la amplificación, el frente delantero del impulso absorbe, prácticamente, toda la energía acumulada en la materia, sin dejar nada a las partes posteriores. Estas no sólo no se amplifican, sino que al contrario, se debilitan, pues una vez entregada su energía al frente del impulso, la materia tiende a adquirir de nuevo esta energía a costa del campo electromagnético que forma las otras partes del impulso. Como resultado, el frente del impulso, al moverse por el medio activo, se amplifica rápidamente, aumentando su pendiente, mientras que su cola va debilitándose notablemente. Es evidente que aquí, al mismo tiempo que aumenta la intensidad del impulso, éste va reduciéndose inevitablemente en tiempo. La potencia do impulso crece simultáneamente a costa de dos causas: como resultado del incremento de su energía y a medida de la concentración de esta energía en tiempo.

Pero los ingenieros de radio no podían utilizar un dispositivo, en el que la amplificación de la señal fuese acompañada de estas distorsiones. ¿Cuál era la conclusión? Una situación semejante surgía ante los ganaderos nómadas cuando éstos tenían que trasladar grandes rebaños. Los primeros hatos se comen toda la hierba y así ellos engordan, sin dejar nada para el ganado que viene detrás y que va enflaqueciendo poco a poco. Esto puede evitarse llevando a los hatos por senderos paralelos o por turnos, con intervalos bastante grandes para que coja fuerza la hierba de los prados. Así procedieron, aproximadamente, los especialistas de radio. Mas por ahora no nos interesan los pormenores de su trabajo.

Los especialistas que trabajan en el campo de los láseres, quienes se esforzaban por aumentar la energía y la potencia de los impulsos de luz y que no pensaban entonces en la información sin distorsión, esperaban que les iban a ser útiles todas las particularidades de los amplificadores cuánticos que habían proporcionado dificultades en el radiodiapasón. En 1962 Heisik y Scovell realizaron en los EE.UU. los correspondientes razonamientos cualitativos, pero este trabajo, como suele ocurrir con frecuencia, adelantó al tiempo y no provocó gran interés. Sólo al cabo de un año, dos grupos de autores norteamericanos publicaron los primeros cálculos; después, al cabo de otro año, publicaron una teoría más completa V. I. Talánov, de la ciudad de Gorki, así como L. A. Rivlin y A. L. Mikaelián, junto con sus colaboradores, de Moscú.

Ese mismo año, Básov y sus colaboradores, y Rivlin y sus colaboradores al año siguiente, así como E. Still y V. Davis en el extranjero dirigieron el impulso gigante de sus láseres al amplificador láser, pero... sus esperanzas frustraron. ¡Ninguno de los tres grupos logró reducir esencialmente la duración del impulso a costa de la distorsión de su forma al efectuar la amplificación!

Al cabo de un año de trabajo tenaz, Básov y Letójov publicaron un artículo explicando las causas del fracaso y el método para alcanzar el objetivo planteado. El contenido de este artículo, que tanto interés despertó entre los aficionados a lo sensacional, señalaba que la cresta del impulso debe correr, en ciertas condiciones, más rápido que la luz.

Vladlén Stepánovich Letójov es una figura singular incluso aquí, en el Instituto de Física

P. N. Lébedev, donde abundan personas originales y talentosas. Igual que muchos otros, él comenzó a trabajar en el laboratorio de radiofísica cuántica siendo aún estudiante. Básov notó muy pronto que el joven tenía facultades y propensión hacia las investigaciones teóricas. Letójov no sólo se pasaba día y noche trabajando inclinado sobre la mesa, sino que observaba atentamente el desarrollo de los experimentos. Junto con los experimentadores, estudiaba el planteamiento de los experimentos y sus resultados, los confrontaba rápidamente con los pronósticos de la teoría y, si el experimento lo requería, se ponía al instante a perfeccionar la teoría. En 1965, comenzaron a publicarse trabajos dedicados a la propagación del impulso de luz en el medio activo. Primero, los trabajos teóricos de Básov y Letójov; más tarde, la descripción de los experimentos realizados con la participación de ésos; luego, de nuevo la teoría y los experimentos. Y así varios años seguidos.

¡Cuándo defender la tesis!

Apartémonos un poco de los láseres para tratar de otro problema que tiene, señalemos de pasada, relación directa con la ciencia. Hagamos la pregunta: "¿Cuándo el científico tiene que defender la tesis?" Por ejemplo, la tesis para candidato a doctor. Habitualmente, se considera que debe hacerlo después de realizar varias investigaciones a nivel de los trabajos de candidato a doctor.

Quienes conocían a Letójov sólo por sus publicaciones no podían suponer que este científico no tuviese el grado de candidato a doctor en ciencias, a pesar de que había publicado en cuatro

años más de cincuenta trabajos. Y cuando en 1969 presentó, por fin, bajo la presión de sus compañeros, su tesis para candidato a doctor en ciencias, el Consejo Científico, después de haberle conferido el grado de candidato, le recomendó presentar ese mismo trabajo, por segunda vez, para obtener el grado de doctor en ciencias. Sin embargo, Letójov no fue por el camino fácil. Prefirió escribir otra tesis y en la primavera de 1970 la defendió brillantemente. En su tesis se trataba sobre la compresión del impulso del láser durante la amplificación y acerca del movimiento superlumínico. Pero volvamos a unos cuantos años antes.

Ahora cualquier escolar sabe que la velocidad de la luz es el límite máximo de la velocidad. Las paradojas, relacionadas con esta ley fundamental, se observan cada vez menos. Y he aquí que ciertos científicos respetables predicen la velocidad superlumínica. Después, junto con otros colaboradores del laboratorio de radiofísica cuántica, obtienen la velocidad superlumínica de movimiento de la cresta del impulso, así como la sucesiva reducción de la duración del impulso gigante.

La teoría de Básov y Letójov tiene en cuenta un detalle bastante importante, el cual se había perdido de vista en las teorías anteriores: por muy rápido que se desarrolle la generación del impulso gigante, éste no surge instantáneamente. En la pantalla de un oscilógrafo rápido puede verse que el frente delantero del impulso gigante no hace recordar en absoluto a un escalón, sino que va creciendo suavemente; es más, aumenta más despacio que el tiempo, durante el cual transcurren los procesos principales en el medio activo. Como resultado, las partículas activas

individuales interaccionan con el impulso amplificado en forma incoherente, o sea, independientemente una de la otra.

La amplificación predominante del cabezal del impulso de pendiente suave conduce al avance paulatino de la cresta del impulso por el frente delantero de tal modo, que el máximo del impulso no se desplaza junto con la cresta de una onda determinada, sino que va transmitiéndose constantemente de la onda posterior a la anterior. Algo semejante podríamos ver en una columna de manifestantes, que sin cesar de andar van pasando los placartes de las filas traseras a las delanteras. Aquí no hay ninguna cosa que pueda contradecir las leyes de la naturaleza, en particular, la imposibilidad de desplazarse los cuerpos materiales a velocidades superiores a la de la luz. En este experimento con velocidad superlumínica no se mueve un cuerpo cualquiera o alguna porción de energía, sino una zona solamente, en la que transcurre con mayor intensidad la transformación de energía acumulada en las partes activas, en otra forma, en forma de fotones de la onda luminosa. La teoría de Básov y Letójov no sólo predijo la posibilidad de movimiento de la cresta del impulso gigante a la velocidad que supera varias veces la velocidad de la luz, sino que explicó también por qué en este caso no se reduce la duración del impulso.

El éxito

La causa consiste precisamente en que el impulso gigante no surge en forma de salto, sino que se desarrolla, aunque rápido pero paulatinamente, empezando por energías muy pequeñas.

Los sectores débiles del frente delantero que se extienden muy por delante de su cresta, se amplifican con eficacia, pasando por las partes más "ricas" del amplificador, no tocadas aún por la parte fundamental del impulso. Al ser débiles, estos sectores se amplifican sin sufrir distorsiones, así que ante el observador aparecen cada vez más sectores nuevos del frente delantero, que al principio se velaban debido a los ruidos. Como resultado, el impulso crece, deformándose un poco solamente, igual que la ola de mar cuando se aproxima a la orilla por un bajío. La ola se vuelca al chocar contra la costa. Puede notarse cómo su flanco frontal se pone más empinado antes de volquearse. La cresta lo alcanza. La catástrofe surge precisamente porque las olas más débiles, las delanteras, son las primeras que llegan a la orilla y se destruyen. Algo similar se necesita también para la compresión del impulso del láser. Básov y Lotójov establecieron que para comprimir el impulso en el proceso de amplificación es menester trincar los sectores débiles de su frente delantero para que no agoten el elemento activo antes de que llegue la cresta. Es preciso que desde un principio el frente delantero del impulso tome la forma algo parecida a la de un escalón. Entonces, precisamente la parte delantera del escalón es la que va a succionar toda la energía acumulada en el amplificador. La cresta comenzará a crecer, mientras que las partes ulteriores del impulso comenzarán a debilitarse, como lo había provisto ya Scovell, y así la reducción del impulso llega a ser una realidad.

Para comprobar la teoría, Básov y sus colaboradores instalaron un obturador adicional entre el amplificador y el láser que da el impulso

gigante. Un circuito especial lo abría con extraordinaria rapidez solamente después de que el impulso gigante alcanzara su máximo. Por eso no entraba ninguna luz en el amplificador antes de aparecer la cresta del impulso gigante. En cambio, la cresta del impulso gigante podía extraer del elemento activo toda la energía que tenía acumulada. El obturador funcionaba tan rápidamente, que el frente delantero del impulso en la entrada del amplificador hacía recordar un escalón empinado. Efectivamente, toda la energía acumulada en el amplificador se derramaba en la cresta del impulso. Las mediciones demostraron que la duración del impulso en la salida del amplificador se reducía varias veces. Sólo a costa de la reducción, la potencia de impulso aumentaba en igual cantidad. En realidad, la potencia aumentaba más rápidamente aún, puesto que el impulso crecía mucho a costa de la energía del amplificador.

Hoy día, en todos los laboratorios donde se trabaja con impulsos gigantes de los láseres que combinan una gran potencia con una gran energía, conectan un obturador adicional entre el láser y el amplificador, obturador que da la forma de un escalón al frente delantero del impulso. Actualmente, sólo en las revistas viejas y en los manuales de electrónica cuántica puede leerse algo acerca de los experimentos con movimiento superlumínico de los impulsos del láser. Este es el destino de muchas paradojas. Estimulan la mente, agudizan la atención y el interés y después de desempeñar su papel, van a parar a los fondos básicos del progreso, a esa sección donde la rueca y el hacha de piedra ocupan lugares de tanto honor. Mientras tanto, resultados menos lustrosos con frecuencia continúan prestando ser-

vicio a la humanidad hasta en nuestros días. Así ocurrió también con esta labor de los científicos soviéticos, para quienes las investigaciones fundamentales y los resultados prácticos tienen la misma importancia.

Para los amantes de las matemáticas

Las fórmulas son más listas que el hombre. Esto lo dijo Heinrich Hertz, descubridor de las ondas electromagnéticas, cuya existencia la había predicho Maxwell a finales del siglo pasado. Hertz tenía en cuenta las famosas ecuaciones de Maxwell, las cuales comprenden no sólo las leyes del comportamiento de las ondas electromagnéticas, sino también la solución de muchos fenómenos desconocidos en aquel tiempo.

Puede decirse que la metrología es más precavida que el hombre. La metrología acumuló posibilidades para medir magnitudes extraordinariamente grandes, así como las muy pequeñas, y construyó, incluso, para ellas un sistema de denominaciones mucho antes de que la técnica encontrase la forma de lograrlo. Efectivamente, para la radiolocalización se necesitó el nombre de los impulsos con duración de una millonésima parte de segundo. Por favor, en el registro de los metrólogos se ha previsto una unidad especial, el microsegundo, aunque antes de eso los hombres rara vez tuvieran que enfrentarse con duraciones que fuesen menores de una milésima parte de segundo, es decir, el milisegundo. Aparecieron los láseres que daban impulsos de luz muy cortos, y ya estaba lista otra unidad más pequeña aún, el nanosegundo, que sirve para medir milmillonésimas partes de segundo. No obstante, esto no era suficiente. Ahora se está

luchando por obtonor y medir impulsos do un picosegundo, más cortos aún mil veces. Por lo domás, los físicos afirman que la vida de algunas partículas elementalos, pertenecientes a una familia cada vez más numorosa, debo ser más corta aún. Poro esto no entra en nuestro tema. Aquí trataremos sobre el surgimiento de impulsos de luz con duración de unos picosegundos.

Para los amantes de las matemáticas podemos añadir que el sistema docimal de números pormito escribir de modo simple, compacto y evidento estas magnitudes inimaginablemente pequeñas. Para esto, en vez de representar una larga hilora de ceros, basta con escribir un diez y elevarlo a potencia negativa, quo demuestra ol lugar después de la coma, donde se encuentra la primera cifra distinta del cero. Por ejemplo, en voz de una décima, puedo oscribirse 10^{-1}; on vez de una milésima, 10^{-3} (la unidad aquí se encuentra en el tercer lugar, a la derecha de la coma: 0,001), Do acuerdo con osta notación, una millonésima parto (micro) será 10^{-6}; una milmillonésima parto (nano), 10^{-9}, y ol picosegundo que nos interesa ahora será 10^{-12} de segundo.

El primer láser, creado por Maiman en 1960, generaba brotes lumínicos que duraban cerca de un milisegundo y que estaban compuestos de una sucesión caótica do picos con duración de un microsegundo. Al año siguiento, Hollwarth inventó ya un láser en el que un obturador especial podía altorar rápidamonto el factor de calidad dol resonador desde una magnitud pequeñísima hasta otra muy grande. El láser generaba impulsos gigantes unitarios con duración de varias decenas do nanosegundos.

El ulterior decrecimiento de la duración de

los impulsos resultó ser inesperadamente difícil. Varios grupos de científicos, siguiendo los razonamientos especulativos cualitativos, y no cuantitativos, de Heisik y Scovell, intentaron acortar, aunque sin éxito, los impulsos gigantes, dejándolos pasar a través de un amplificador óptico.

Unicamente la compleja investigación teórica, que realizaron Básov y Letójov, permitió comprender la causa del fracaso y hallar la salida del atolladero. Mas este camino no condujo a un avance substancial. Desde luego, la reducción del impulso gigante hasta dos o tres nanosegundos, con la amplificación simultánea de su energía, permitió penetrar más aún en los escondrijos de la naturaleza. Pero los científicos ansiaban resultados radicales.

Por muy paradójico que sea, lo más difícil es lograr nuevos y considerables éxitos, yendo por el camino trillado. El camino fácil, recto y atractivo en el mundo de la ciencia no llega, generalmente, muy lejos. Y más allá, las inevitables curvas conducen a baches e, incluso, a un atolladero. Mas — así es la naturaleza humana — es difícil decidirse a torcer hacia las tierras vírgenes, si por delante se divisan caminos apisonados. Si hablamos de caminos que conducen al mundo de los impulsos supercortos de luz, podemos señalar que uno de ellos lo abrió la teoría de oscilaciones no lineal, creada y desarrollada, principalmente, en las obras de dos escuelas soviéticas de físicos y matemáticos: la escuela de Mandelshtam y Papaleksi, y la escuela de Krílov y Bogoliúbov. Esta teoría puso al descubierto y tenía como armamento la profunda unidad, oculta detrás de la diversidad externa de los numerosos procesos periódicos que

transurren en la naturaleza y creados por el hombre para las necesidades de la técnica.

El sabio holandés Van De-Poele, quien hizo una gran aportación a la teoría de oscilaciones no lineal en las primeras etapas de su desarrollo, descubrió una analogía asombrosa entre el trabajo del corazón y el generador de tubos termoiónicos de oscilaciones eléctricas. Más tarde, se logró crear cómodos modelos radiotécnicos para investigar el funcionamiento del corazón, los riñones, los pulmones y otros órganos del cuerpo humano. Los métodos de la teoría de oscilaciones no lineal se usan muchísimo ahora en la biología, química, astrofísica, sismología, ciencias ingenieriles e investigaciones económicas.

El láser surgió merced a la penetración de los métodos de la teoría de oscilaciones no lineal en el diapasón óptico. Y no fue casual, ni mucho menos, que la electrónica cuántica la creasen los radiofísicos Básov y Prójorov, maravillosos representantes de la escuela de Mandelshtam y Papaleksi, así como Townes, gran entendido en la teoría de oscilaciones no lineal. El desarrollo ulterior de la electrónica cuántica, incluso su avance hacia el diapasón óptico, mas bien se debe a los especialistas en radio, que han asimilado la óptica, y no a los ópticos, que se han interiorizado en las leyes de la teoría de las oscilaciones.

El reino del caos

En la mayoría de los casos, el elemento activo del láser no participa en su trabajo como un todo único. Por lo general, las distintas partes del volumen laboral no comienzan la generación simultáneamente y lo hacen, incluso, en varias



frecuencias diferentes. La causa consiste en que el resonador del láser es muy grande en comparación con la longitud de las ondas luminosas. Por eso pueden surgir en él, y surgen, por lo general, muchísimos modos de oscilación, distintos e independientes.

Algo semejante puede observarse en la cuerda del violín o de la mandolina, en la que, además del tono principal, pueden excitarse también

modos mayores. Los músicos aprovechan muy pocas veces esa posibilidad. Sin embargo, los ingenieros de radio recurren a ella en muchos casos, cuando necesitan crear impulsos eléctricos cortos, como, por ejemplo, en la radiolocalización o la televisión. Para estos fines se han creado esquemas especiales. Entre ellos, los más conocidos son los multivibradores y los osciladores de bloqueo, que excitan simultáneamente muchísimas oscilaciones adicionándose una con la otra de tal modo que crean una serie de impulsos cortos o saltos bruscos de tensión aislados, por cuya orden en la pantalla surgen cuadros raros o se desprende del lugar un cohete impetuoso.

A diferencia de esas válvulas osciladoras, en los láseres reina el caos completo. Las heterogeneidades inevitables en los cristales, vidrio e, incluso, gases, que sirven de material activo en los láseres; la imposibilidad de asegurar una excitación totalmente uniforme en todo el volumen del láser; los numerosos modos de oscilación que surgen en el resonador del láser, todo eso conduce a que la mayoría de los modos de oscilación se excitan, por lo general, independientemente de los demás. Al observar a través de unas gafas protectoras una mancha de luz brillante, formada por el rayo del láser a gas, veremos en el primer momento algo semejante al reflejo de sol. Mas, si miramos atentamente, notaremos que la mancha brillante está compuesta de distintos gránulos irisados y caóticos, divididos por franjas menos brillantes. Se parece mucho a la superficie del Sol cuando se observa éste a través de un telescopio. Allí se distinguen también muchísimos puntos brillantes sobre un fondo algo más oscuro.

Los físicos, desde luego, comprendían que

existían distintas causas por las cuales surgían los gránulos solares y los puntos brillantes en el rayo del láser a gas. Solamente había en ellas una cosa común: el papel esencial que jugaba la casualidad en la distribución de la temperatura por la superficie del Sol y en el desarrollo de la generación en el elemento activo del láser. Esos mismos fenómenos surgían también en los láseres al estado sólido y que funcionaban en el régimen impulsional. En ellos, la excitación casual e independiente de los distintos modos de oscilación conduce al surgimiento de picos caóticos de generación. Los experimentadores y los teóricos se unieron para analizar este funcionamiento contradictorio de los láseres.

Una investigación muy detallada de los impulsos gigantes emitidos por los láseres con obturadores controlados o con prismas giratorios demostró que estos impulsos gigantes son también producto de la excitación de los diversos modos de oscilación.

La teoría de oscilaciones sugería lo siguiente: el láser se diferencia del oscilador de lámparas solamente por la longitud de onda generada y algunos otros detalles técnicos; están basados en principios únicos. Esto significa que es posible obligar a que los diversos modos de oscilación surjan en los láseres coordinadamente, igual que, por ejemplo, en los multivibradores. En este caso, el láser dará una sucesión regular de impulsos cortos.

Es natural que muchos investigadores marcharan por este camino. Los primeros que obtuvieron éxito fueron L. Hargrow, R. Fork y M. Pollack, que trabajaban con el láser a gas. Después, el láser a rubí le trajo suerte a Deutsch. Por fin, cantaron victoria A. De María, S. Fer-

rar y Danielson, que trabajaban con el láser a vidrio de neodimio.

— Variábamos las pérdidas, forzosa y periódicamente, en el resonador del láser — explicaban los científicos a sus colegas.

Ellos empleaban el procedimiento habitual para los especialistas en radio, que era el siguiente: cambiaban en el resonador las condiciones de existencia de las ondas electromagnéticas. Pero el simple procedimiento conducía a resultados complicados. Si la frecuencia del cambio de pérdidas coincidía en este caso con el intervalo de frecuencia entre los más simples modos de oscilación del resonador, los modos resultaban ser coherentes.

La teoría de las oscilaciones no falló. El láser, que en el régimen de generación libre daba impulsos de milisegundos, compuestos de muchísimos picos, se convirtió en un generador de impulsos de nanosegundos. Si por influencia externa era posible lograr la coherencia entre veinte modos de oscilación, la duración de los impulsos era solamente la mitad de un nanosegundo. ¡Eso era unas cinco o diez veces más corto que en los láseres con prisma giratorio!

¡Era un récord! ¡Una sensación! Dio un nuevo empuje a las búsquedas y a los esfuerzos. El camino resultaba muy seductor, sencillo y fácil de realizar. Además, daba resultados rápidos y perceptibles. Sólo había que poseer la facultad de sentir las particularidades de los materiales de los láseres: cuáles y a qué eran capaces éstos. Qué se podía sacar de ellos. Hasta qué punto eran flexibles en la posibilidad de esculpir los impulsos de luz necesarios para los físicos. Algunos científicos descubrieron incluso en sí mismos un tacto peculiar, una intuición en la selección

de materiales para los láseres, que eran muy precisos para el nuevo objetivo.

Y he aquí que la mitad del nanosegundo, este reciente récord, fue vencido de nuevo.

De nuevo un atolladero

El científico norteamericano M. di Domenico y sus colaboradores lograron obtener impulsos que eran diez veces más cortos. Ellos controlaban periódicamente las pérdidas en el láser con un material que en aquel tiempo era totalmente nuevo: un cristal de granato itrio-alumínico. Pero la cosa no fue más allá. Esta vez, el camino directo iba a parar a un atolladero. Unicamente una idea espontánea o el estudio minucioso de las causas del fracaso podía sacar de este callejón sin salida.

El salto siguiente lo realizaron el físico norteamericano De María y sus colaboradores. Un salto que se medía con miles de unidades de suerto, y no con decenas o centenas, como suele ocurrir al caminar por la vía tradicional. Los grupos de Básov y Prójorov siguieron rápidamente a De María. Ahora, la nueva fuente de impulsos con duración de hasta unos picosegundos se utiliza mucho y es hoy día una cosa cotidiana e imprescindible en este círculo de científicos.

En el primer experimento realizado por De María todo parecía muy simple. Puede decirse que no hizo nada nuevo. Sólo estudió más detalladamente aquello que él y otros habían obtenido antes. Lo obtuvieron sin saber lo que tenían en sus manos.

Para controlar el factor de calidad del láser, De María y sus colaboradores utilizaban el absorbedor saturador. Esto mismo lo hacían tam-

bién otros. Resultaba todo muy simple. Dentro del resonador del láser situaban un recipiente muy fino, lleno de una solución de colorante especial. Era un colorante malo desde el punto de vista de cualquier persona razonable. Este colorante no servía para ser utilizado de manera habitual, pues se decoloraba muy pronto bajo la influencia de la luz, tornándose transparente. Pero era precisamente este colorante el que los físicos solicitaban a los químicos.

El recipiente con el colorante tapaba uno de los espejos del resonador. La generación no podía comenzar, a pesar de que la lámpara relámpago bombeaba el elemento activo. Pues, al estar obturado el espejo, faltaba la reacción, la cual era imprescindible para el surgimiento de la generación. Mas, a medida que ascendía el nivel de excitación, la barra activa se ponía cada vez más brillante. Su capacidad amplificadora comenzaba a ser tan enorme que los fotones, que volaban a lo largo de su eje, eran capaces de arrastrar consigo a cientos de fotones como éstos. Por fin, llegaban a ser tantos, que por su influencia el colorante comenzaba a perder el color. Parte de los fotones se precipitaba al segundo espejo y después regresaba. Así era cómo emergía la reacción que conducía al surgimiento de la generación y al aumento en avalancha del número de fotones que volaban a lo largo del eje del resonador. En un momento determinado, brotaba del láser un impulso gigante de radiación. Parecía que en ésto se concentraba toda la energía de los fotones que se había acumulado antes de que el colorante perdiera su color y permitiera a la avalancha de fotones abrirse paso hacia el espejo. En 1966, esto no era ya una novedad. Pero nadie más que De María y

sus colaboradores descubrieron que, a diferencia de los impulsos gigantes obtenidos por medio de un prisma giratorio o un obturador electroóptico, el nuevo impulso se componía de una secuencia regular de impulsos extraordinariamente cortos.

Las mediciones demostraron que estos impulsos surgían exactamente entre intervalos, necesarios para que la luz pueda pasar del espejo semitransparente, a través del elemento activo, hasta el espejo opaco, y viceversa. ¡La duración de cada uno de ellos era de varios picosegundos, unas cuantas unidades multiplicadas por 10^{-12} de segundo! Para todo el mundo estaba claro que el fenómeno descubierto en estos experimentos se debe a la coherencia de los distintos modos de oscilación, cuya radiación interviene en la clarificación del colorante. La coherencia surge a consecuencia de la conjunta interacción con el colorante. Es la autopuesta en fase — así definen los físicos dicho fenómeno — y se distingue de la puesta en fase estimulada, obtenida como resultado del cambio periódico de las pérdidas del resonador utilizado antes para obtener impulsos cortos.

La única cosa desagradable para De María era que los impulsos adquiridos tenían poca energía. No obstante, a pesar de la poca energía que poseía cada impulso (en el experimento de De María llegaba sólo a unas centésimas y hasta unas milésimas de julio), esa corta duración garantizaba potencias instantáneas enormes que llegaban a alcanzar miles de millones de vatios.

Haciendo pasar estos impulsos a través de un láser amplificador, De María logró aumentar más aún su potencia. Un poco más tarde, Básov y sus colaboradores alcanzaron, de este mismo

modo, una potencia de mil kilovatios. Esto era un récord. Un aficionado a la generalización hizo la conclusión de que después de haberse creado los láseres en 1960, la potencia de los impulsos de luz generados por éstos ¡aumentaba anualmente casi unas diez veces! ¿Cuánto tiempo durará este crecimiento?

La intromisión de un teórico

El láser, que origina impulsos de luz ultracortos y superpotentes, este fenómeno de la física moderna, llegó a ser un objeto de minuciosa investigación experimental y teórica en muchos laboratorios. Era también un enigma en el sentido teórico y en lo referente a las posibilidades que se ocultaban en su potencia retenida y que se lanzaba instantáneamente, igual que la serpiente lanza su veneno al morder.

Durante dos años después de que De María descubriera el fenómeno de la formación de los impulsos con duración de hasta unos picosegundos y revelara sus rasgos principales, fue cristalizando poco a poco hasta llegar a admitirse universalmente el muy evidente punto de vista acerca del proceso de formación de estos impulsos.

Se opinaba que el impulso de luz con duración de hasta varios nanosegundos era formado a consecuencia de la interacción de ciertos modos de oscilación de láser simplísimos, con la participación del colorante clarificativo. Semejante proceso había sido bien estudiado para el caso de la variación periódica de las pérdidas, que ya conocemos. Parecía estar claro que la siguiente compresión de este impulso hasta unos picosegundos de duración se efectuaba a consecuencia

de que el impulso pasaba reiteradas veces a través del colorante.

No obstante, este punto de vista tan simple y evidente, tropezaba con una serie de dificultades. Letójov demostró, basándose en cálculos minuciosos, que era erróneo el punto de vista adoptado por todos sobre el mecanismo de la compresión de impulsos con duración de hasta unos nanosegundos. Por esta vía su duración puede reducirse solamente 10—20 veces, y no miles de veces, como se observa en la realidad. Si el mecanismo reconocido universalmente es incapaz de transformar los impulsos de unos nanosegundos en impulsos de unos picosegundos, eso quiere decir que hay que seguir buscando. Es necesario analizar otra vez más todos los detalles del experimento, principalmente los que no están incluidos en la teoría aceptada por todos, pero que influyen en el resultado.

El teórico que participa activamente en los experimentos que le interesan, es una gran suerte para el laboratorio. Letójov se interesa mucho por aquello que la mayoría de los experimentadores consideran una cosa sobreentendida, que no es digna de atención, que no merece ser mencionada ni siquiera en un informe o artículo. Así es cómo a él le surge la siguiente suposición, una nueva pregunta. Pregunta que no puede surgirle ni al teórico más genial, si éste juzga sobre el experimento solamente por las publicaciones, en las que por falta de sitio no se señalan muchos detalles.

Los experimentadores sabían que cualquier obstáculo de más, que conduzca a la reflexión de la luz dentro del resonador y en dirección de su eje, empeora las condiciones de formación de los impulsos con duración de hasta unos pico-

segundos. Lo sabían, y eliminaban todo lo que les pudiera molestar. Pero no reflexionaban en el por qué son nocivas las reflexiones, y no la absorción de la luz o la pérdida de energía. Así proceden muchos. Y no porque les dé pereza de pensar. No, todas sus fuerzas están dirigidas a alcanzar el objetivo. Para esto, son capaces de superar cualquier obstáculo. Simplemente es que no tienen tiempo para dejar a un lado la solución del problema inmediato y para superar la trama de turno de la naturaleza-madre. Y qué les importa a ellos que una superficie reflectora de más dentro del resonador engendre juntamente con sus espejos un filtro óptico que corta y suprime muchos modos de oscilación simples. Prohibiéndoles que participen en el juego. ¡Prohibiéndoles! ¡Y son tan necesarios para crear impulsos de picosegundos! Pues no es por capricho el que los experimentadores luchen contra las reflexiones excesivas. La estricta necesidad les obliga a eliminar todo lo que pueda desempeñar el papel de filtro; filtro que reduce la cantidad de modos de oscilación que participan simultáneamente en el trabajo del láser. ¿En qué consiste su papel?

Así pues, ¿no dejan escapar los experimentadores, que luchan contra las reflexiones, alguna cosa muy esencial? ¡Posiblemente que ellos no sepan que están hablando en prosa, igual que el protagonista de Moliere!

Es menester volver atrás; hay que empezar por el abecé. Examinar de nuevo todo el proceso de generación del láser... Todo lo que sucede en él es muy simple. El destello de la lámpara de bombeo excita el elemento activo. Los numerosos modos de oscilación del resonador aseguran independientemente el cierre de los correspon-

dientes canales de la reacción. Y en el resonador surgen numerosos láseres independientes, cada uno de los cuales, ora resplandeciendo, ora amortiguándose, emite sus picos de luz, que se suman caóticamente en lo que nosotros percibimos como el impulso del láser.

El caos... Esto no se somete a la mecánica de Newton, ni a las ecuaciones de Maxwell, ni a la teoría de la relatividad. ¿Cómo llegar a comprenderlo? ¿Cómo apaciguarlo y dominarlo? No obstante, también se puede con él. La estadística. Esta ayuda a comprender la imprudencia de la economía. Dirige el trabajo de los biólogos. Pone a disposición de los físicos a su hija: la física estadística, a la que precisamente Letójov llamó en ayuda.

He aquí lo que la física estadística le comunicó a Letójov.

Al superponer casualmente muchos modos de oscilación simples, en el láser surgen cortos brotes de radiación con duración y amplitudes fortuitas. Si participan en esto diez o veinte modos de oscilación simples, los brotes no pueden ser más cortos de varios nanosegundos. Pero cuando en el juego de las casualidades participan centenas de oscilaciones, pueden producirse impulsos de unos picosegundos. Además, sus amplitudes serán mucho mayor que las demás.

¡He aquí la solución del enigma! Eliminando cuidadosamente todas las reflexiones y utilizando elementos buenos y activos, puede asegurarse el surgimiento de centenas de modos de oscilación. Los impulsos de unos picosegundos, creados por estas oscilaciones a voluntad de la casualidad, se abren camino más rápidamente, que otros a través de la cubeta con colorante, provocan la avalancha de generación y, acrecentán-

dose y acortándose poco a poco, pasan una y otra vez por el resonador, derramándose por el espejo semitransparente en forma de una cadena regular de impulsos ultracortos.

El experimento realizado especialmente en el Instituto de Física de Academia de Ciencias, con la participación de Básov y Letójov, confirmó que los impulsos ultracortos surgen, efectivamente, antes de que el colorante se clarifique, y después se produce su compresión y amplificación complementarias.

Esta labor conmovió a los teóricos y experimentadores. Se comenzó a repetir el experimento y a precisar los resultados. Comenzó la rivalidad de las deducciones.

Los planes

Al poco tiempo, Fleck el Menor confirmó con cálculos numéricos directos el mecanismo estadístico de generación de los impulsos ultracortos. Se creía que ya estaba todo. Una victoria más. Parecía que llegó el momento de poner punto y pasar a otro tema. Sin embargo, no había llegado todavía la hora. Básov y Letójov, con sus colaboradores, querían exprimir todas las posibilidades del secreto descubierto en cuanto a la formación de impulsos ultracortos. Ellos vieron dos posibilidades nuevas.

He aquí la primera, basada en una consideración muy simple. El láser, que genera impulsos de unos picosegundos merced al empleo del colorante clarificante, no se somete totalmente a la voluntad del hombre. Efectivamente, el momento de clarificación llega por voluntad de la casualidad, como resultado de una compleja combinación de procesos no controlados. Todo depende

de cómo se desarrolla la carga eléctrica en la lámpara relámpago, de cómo se acumula la energía en el elemento activo, de cómo se componen entre sí los numerosos modos de oscilación y, por fin, de cómo transcurre el proceso de decoloración del colorante.

Hace falta que las etapas principales del proceso se sometan a la voluntad del hombre, que se suprima la influencia de la casualidad. Que la solución del colorante sea tan concentrada, que ni siquiera pueda clarificarla el impulso más intenso de los que pueden surgir fortuitamente en el elemento activo. Entonces, a pesar de la acción de la lámpara de bombeo, la generación no comenzará.

Esto es solamente el primer paso. Luego, durante el destello de la lámpara de bombeo, dirigimos un impulso corto desde un láser auxiliar al elemento activo, impulso lo suficientemente intenso para quemar el colorante. El impulso abrirá paso a la avalancha de fotones y ésta, pasando una y otra vez a través del elemento activo, liberará toda la energía acumulada en él, transformándola en una sucesión de varios impulsos potentes ultracortos.

Básov y sus colaboradores construyeron un láser así. Se componía éste de dos partes: el láser que generaba impulsos de unos picosegundos con energía desde 10^{-3} hasta 10^{-2} julios, y el obturador que dejaba pasar sólo uno de estos impulsos a la segunda parte de la instalación. La segunda parte representaba, de hecho, un amplificador láser de onda progresiva. Su elemento activo estaba situado a uno de los lados del triángulo formado por tres espejos. Junto a ellos iba situada también la cubeta con la solución del colorante, lo suficientemente concentra-

da para poder excluir toda posibilidad de autoexcitación de la etapa amplificadora.

Pero tan pronto como el impulso ultracorto que ingresaba de la primera parte de la instalación clarificaba el colorante, este impulso de poca potencia recorría unas cinco o siete veces el triángulo formado por los espejos y extraía del elemento activo toda la energía acumulada en él. Las mediciones demostraron que la energía total del tren compuesto por esos cinco o siete impulsos ultracortos obtenidos de este modo, constituía 18 julios. ¡Y el valor de la energía del impulso aumentaba en este caso varias centenas de veces!

Dicha instalación resultaba ser un récord para su tiempo. Mas los físicos del Instituto de Física de la Academia de Ciencias tenían aún una reserva de posibilidades no realizadas.

CAPITULO III

CONTRA LA CORRIENTE

¡Qué pasará, si...!

La costumbre... ¿Habrá en el mundo algo más estable que la costumbre? Por lo demás, es posible que con ella rivalice la confianza en la autoridad. No en vano durante varios milenios tuvieron fama de ser verdades muchas necedades y sólo porque así era la opinión de Aristóteles.

El rayo de luz fue el símbolo de la rectitud durante muchos siglos. Se necesitó el coraje de Fresnel y su confianza en el poder de las matemáticas para reconocer que la luz era capaz de contornear los obstáculos. No obstante, los más sabios de los sabios — los miembros de la Academia de Ciencias de Francia — no lo creyeron. Y exponían las refutaciones más evidentes, basadas en la experiencia multisecular.

De la fórmula de Fresnel se deducía que detrás de una pantalla opaca, la zona de sombra no aparecía de repente. Esta surgía, como si acumulase fuerzas, en forma de rayas estrechas, repitiendo el contorno de la pantalla y alternándose con las rayas de luz cada vez más débiles. Todos sabían que esta predicción estaba en contradicción con los hechos evidentes. Es más, este desdichado ingeniero, expulsado del servicio durante los Cien Días de Napoleón, este físico autodidacto, predijo, en realidad, que detrás del agujero en la pantalla opaca, la luz debe alternarse con la oscuridad. Tal cosa no la había visto nadie y todos estaban seguros de que eso no podía ser.

Como árbitro intervino el experimento, que

para ese tiempo se afirmó ya como la autoridad superior en la ciencia. Pero no la experiencia "multisecular" sin personalidad y sin nombre, sino el experimento que puso especialmente Fresnel junto con el físico francés Arago, experimento simple, evidente y accesible, por lo menos para cualquier estudiante de la universidad. Tanto el simple experimento como la teoría ondulatoria de Fresnel ocuparon su lugar de honor en el fondo de oro de la ciencia, y no los refutaron, sino que solamente se completaron con las obras de muchas generaciones de sabios. Por lo visto, el temperamento, más que cualquier otra cosa, es lo que determina si el hombre va a dedicarse a desarrollar, complementar y precisar los resultados ajenos o si tiene que enunciar y defender sus propias ideas nuevas.

Apenas le había dado tiempo a Gurguén Ashótovich Askarián de aclimatarse debidamente en el Instituto de Física de la Academia de Ciencias de la URSS, cuando sus nuevos colegas comprendieron que este científico no se contentaría con desarrollar y precisar las cosas. La pregunta "¿Qué pasará, si...?" no le surgía sólo en el caso cuando cuadraba mejor la pregunta "¿Por qué?" Y la pregunta bien planteada es ya la mitad de la respuesta. Askarián no se tranquilizaba hasta que no hallara la otra mitad.

Entre las numerosas preguntas que perseguían a Askarián y las muchas que recibieron su respuesta, a nuestro relato se refiere la siguiente: "¿Qué pasará si el rayo de láser cae en un medio transparente para él?" La naturaleza del medio no tiene importancia, es substancial la transparencia. No debe haber pérdidas de energía, pues éstas solamente enturbian la pregunta que planteaba ya el académico Vavílov: ¿Cómo

influye el medio en la luz, si la potencia de la luz es grande?

Meditaciones... Confrontaciones de hechos, que parecían estar muy alejados... Fórmulas escritas a toda prisa y tachadas después... Abatimiento y esperanzas... Y de súbito, un destello. Siempre de súbito. Una conclusión, de la que rebotan todas las objeciones.

Esta vez la respuesta decía: deben existir muchísimos medios transparentes, en los cuales el rayo de láser no divergirá, como habría que esperar al basarnos en la indiscutible teoría de Fresnel.

No, Askarián no pensaba refutar la teoría de Fresnel. No la ponía en duda. Simplemente comprendió que en nuestro siglo del láser las condiciones han cambiado. En el proscenio aparecieron fuerzas nuevas que Fresnel desconocía por completo. Unas fuerzas que, siendo de segundo orden en aquellos tiempos, salieron al primer plano.

El astrónomo Snell, a quien habían olvidado hacía tiempo, estableció la ley de la refracción de la luz. Al pasar el límite entre dos medios transparentes, el rayo incidente se deforma, dándole comienzo al refractado. Originalmente, los científicos habían tratado sólo el problema del paso de la luz del aire a otro medio transparente o a la inversa, es decir, de un medio transparente al aire. En estos casos, el ángulo entre los rayos incidente y refractado se determinaba únicamente por las propiedades del medio. Mejor dicho, por una de sus características,denominada índice de refracción.

El gran Maxwell consideraba esta magnitud como una de las constantes más importantes y la introdujo en sus famosas ecuaciones. Sin em-

bargo, en aquel tiempo se sabía ya que el índice de refracción no era una magnitud constante en el sentido estricto de la palabra. Para cada sustancia este índice es invariable únicamente en determinadas condiciones exteriores. Varía con la temperatura y la presión, bajo la influencia del campo eléctrico y el campo magnético. Esto lo sabían todos los que conocían algo de óptica. En su tiempo, los científicos interesados por la óptica habían esclarecido bastante bien cómo depende el índice de refracción de las condiciones exteriores.

Hacia lo desconocido

Askarián sabía que los láseres abrieron un ancho camino que conducía a la zona donde nadie había penetrado todavía, a excepción de Vavílov y sus discípulos: la rama de la óptica no lineal. Aunque hay que decir también que ellos únicamente habían franqueado el umbral y sólo lograron demostrar la realidad de su existencia. En esta zona desconocida, las magnitudes "constantes" varían incluso en el caso de que las condiciones exteriores son absolutamente invariables. Dependen de la potencia de la propia luz y son muy sensibles a sus variaciones.

Verdad es, que en vida de Vavílov, las fuentes de luz eran de tan pequeña potencia, que se necesitaba todo su arte para demostrar la realidad de semejantes procesos.

Pero la situación ahora había cambiado radicalmente. La potencia del rayo láser podía llegar a ser tan grande, que de él debe depender el índice de refracción. ¡Y si esto es así, el rayo láser debe, en condiciones determinadas, torcer a sí mismo!

"Ante todo — pensaba Askarián —, esto deberá manifestarse en la desviación de las leyes con respecto a las de Fresnel sobre la propagación de la luz".

De las leyes de Fresnel se deduce que en la óptica mucho de lo que parece simple, es totalmente inaccesible. Por ejemplo, nadie podrá obtener un haz de luz totalmente paralelo cortando, con ayuda de un agujero estrecho, el centro de un haz casi paralelo. Si el haz originario sale de un agujero ancho, es difícil establecer si ése es paralelo o no. En cambio, siendo el agujero mediante el cual se corta un haz estrecho bastante pequeño, resulta que es fácil establecer la falta de paralelismo del haz que sale de él. Sólo hay que apartarse bastante del agujero.

La verdadera ciencia no soporta semejantes nociones indeterminadas como "bastante". En este caso existe, desde luego, una distancia totalmente determinada, en la que no cuesta nada descubrir el ensanchamiento de la luz a través del haz. Para este fenómeno existe incluso un nombre especial: "longitud de difracción". Y si las dimensiones del agujero se aumentan el doble, ésta aumentará cuatro veces.

La dilatación difraccional de los haces de luz no depende de la naturaleza del medio. En el vacío es igual que en cualquier otro medio transparente y no depende de la intensidad de la luz. Un rayo láser de cualquier potencia se somete a las leyes de Fresnel, igual que se somete la luz de las lejanas estrellas.

La idea de Askarián consistía en que en algunos medios, bajo la influencia de potentes rayos de láseres, deberán surgir nuevos procesos, capaces de superar la dilatación difraccional de los haces de luz. En tales medios, los potentes

haces de luz deberán ir sin ensancharse, y los que son más potentes aún deberán comprimirse incluso.

Cualquiera de los procesos que conducen al aumento del índice de refracción del medio, a medida que se acrecenta la intensidad de la luz puede, al fin y al cabo, superar el escape de la energía del haz, escape provocado por la difracción.

Hace unos cien años, el científico escocés John Kerr descubrió el fenómeno que en su tiempo quería descubrir el gran Lomonósov. En uno de sus programas, este gran sabio ruso señalaba: "Es necesario hacer un experimento para ver si el haz de luz se refracta de otro modo en el vidrio y el agua electrizados". Esto mismo intentaba lograrlo también, aunque sin resultado alguno, el genio del experimento, Faraday.

Kerr estableció que la refracción de la luz en el vidrio varía radicalmente si a éste lo situamos entre las armaduras del condensador cargado hasta alta tensión. Puede uno imaginarse la alegría del sabio, que descubrió lo que no pudieron lograr sus eminentes antecesores. El estrecho haz de luz que iba a través del vidrio, al conectar la tensión eléctrica se desintegraba de repente en dos, que divergían formando un ángulo entre ellos. Al desconectar la tensión, el efecto desaparecía. Era cierto que el vidrio situado en un campo eléctrico se comportaba de otro modo que habitualmente. El campo eléctrico convertía al vidrio en algo semejante al espato de Islandia, en cuyo cristal, E. Bartholinus, profesor de Copenhague, descubriera todavía en 1670 el desdoblamiento de los rayos de luz: la birrefringencia.

Entonces esto fue interpretado casi como un

truco. Más tarde este fenómeno lo observaron en muchos cristales. Después resultó que también podía provocarse artificialmente en los cristales en los que en condiciones habituales no se observa o incluso en el vidrio. Para esto, era suficiente con oprimirlos o someterlos a un calentamiento irregular. ¡Y él, Kerr, logró obtener la birrefringencia bajo la acción de un campo eléctrico!

Mas... un verdadero científico se distingue, ante todo, por la facultad de autocrítica. Por lo demás, dicha facultad distingue al verdadero hombre independientemente de su especialidad. Kerr sabía que la birrefringencia en el vidrio puede también provocarse por medio de la electrostricción, o sea, la deformación de los cuerpos bajo la acción de un campo eléctrico externo. Esta deformación, igual que una simple presión, hacía que las propiedades del vidrio dependieran de la dirección. Lo dicho significaba, que había aún que cerciorarse si lo descubierto era en realidad un fenómeno nuevo — la aparición de la birrefringencia como resultado de la influencia directa del campo eléctrico — o era que participaba en el proceso la electrostricción.

Pero Kerr sabía también otra cosa y era que la electrostricción es incapaz de provocar la birrefringencia en los líquidos. Por consiguiente, había que repetir el experimento en líquidos. Y Kerr encontró líquidos en los que se observaba este efecto nuevo, el efecto electroóptico, que entró en la ciencia con el nombre de efecto Kerr. Más tarde, él descubrió que la aparición de la birrefringencia en algunas sustancias puede provocarse también por medio de un campo magnético, pero esto sale ya de los márgenes de nuestro tema.

Para nosotros es importante que el efecto electroóptico no se reduce al surgimiento de la birrefringencia. No sólo el campo eléctrico constante, como aquel que figuraba en los experimentos de Kerr, sino también un campo eléctrico variable en tiempo, incluyendo la parte eléctrica de la onda luminosa, conducen a la alteración del índice de refracción de los cuerpos transparentes. Además, el índice de refracción aumenta junto con la intensidad de la luz. Este es uno de los procesos capaces, según las ideas de Askarián, de compensar la divergencia difraccional de los haces luminosos.

Historia y geografía

Askarián expresó sus consideraciones en un seminario dedicado a la electrónica cuántica, organizado por el Instituto de Física de la Academia de Ciencias de la URSS, en el que participaba la mayoría de los especialistas de Moscú y de muchas otras ciudades. Los resultados fueron publicados después en la "Revista de física experimental y teórica", mundialmente conocida.

Este pequeño artículo se distingue por la riqueza y la novedad del contenido, tan características para Askarián. En él se demuestra que el fenómeno no sólo tiene valor teórico y cognoscitivo, sino también puramente práctico, muy importante y de perspectiva. Según la opinión de Askarián, la heterogeneidad transversal del campo de un rayo electromagnético intenso puede, según el deseo, utilizarse para atraer los electrones y los átomos hacia el eje del haz, o para repulsarlos al exterior, y crear, de este modo, la compresión o la rarificación del gas. Es posible

crear en el gas un canal para el paso de los electrones o el plasma. Hacer un "tapón" junto al agujero que une los vasos donde las presiones del gas son distintas. Utilizarlo para calentar el plasma, para transportarlo y para crear conductores plásmicos. Y, naturalmente, para crear guíaondas y autoenfoques...

Para muchos especialistas que trabajaban en las más complejas ramas de la física del plasma, esta novedad sonó algo así como si a un simple mortal le dijeran que ya podía andar por el mar igual que por tierra.

En 1963, N. F. Pilipetski y A. R. Rustámov comunicaron en un pequeño suplemento a la "RFET" acerca de la primera observación experimental del nuevo fenómeno: el autoenfoque de los rayos luminosos. En sus experimentos se registraron por medio de la fotografía finos hilos luminosos en líquidos a través de los cuales pasaba un rayo de láser a rubí, previamente enfocado. En nuestros días, el efecto de autoenfoque se manifiesta en la mayoría de los experimentos relacionados con el paso de impulsos gigantes de luz de los láseres a través de los líquidos. El efecto puede observarse también en los gases y en los sólidos.

El nuevo efecto exigía también un análisis teórico. El primero que calculó el perfil del haz luminoso que se autocanalizaba bajo la influencia del efecto Kerr, de alta frecuencia, fue el joven físico V. I. Talánov, de la ciudad de Gorki, actualmente profesor.

Talánov pertenece a la tercera generación de la magnífica escuela soviética de físicos, fundada por los académicos Mandelshtam y Papaleksi. Dicha escuela enalteció nuestro país con sus brillantes obras y grandes descubrimientos en la

rama de la teoría no lineal de las oscilaciones, de la radiofísica, de la óptica y de muchas otras esferas de la ciencia. A la segunda generación de esta escuela pertenecen también eminentes sabios, como los académicos A. A. Andrónov y M. A. Leontóvich. Forman parte de su tercera generación los académicos A. V. Gapónov y V. L. Ginzburg, así como los fundadores de la electrónica cuántica, los académicos A. M. Prójorov y N. G. Básov. El último comenzó su labor científica bajo la dirección de Prójorov, aunque antes fue alumno del académico I. E. Tamm, colaborador de Mandelshtam.

Ruego al lector que me perdone por esta digresión a la genealogía científica, pero aquí no está de más.

Ahora pasaremos por poco tiempo a la historia y mencionaremos la geografía.

En los años del primer plan quinquenal, el pueblo soviético comenzó la compaña por la conquista de la gran ciencia. Se ampliaban los viejos centros científicos y se creaban nuevos. Uno de ellos se fundó en el Volga, en la vieja ciudad industrial de Gorki. La escuela de Mandelshtam envió allí un núcleo fuerte, del que formaban parte los jóvenes y talentosos físicos A. A. Andrónov, G. S. Gorélik, M. T. Gréjova y otros. Ellos apoyaron y multiplicaron las tradiciones de la escuela, y, a su vez, prepararon toda una generación de científicos, entre los que se encontraba también Tallánov.

Antes de dedicarse a la teoría de los haces luminosos autocanalizantes, Talánov hizo un aporte esencial a la teoría no lineal de las oscilaciones y en la teoría de la propagación de las ondas electromagnéticas. La autocanalización de las ondas electromagnéticas es uno de los ejem-

plos típicos de cómo las no linealidades determinan los fenómenos más esenciales. Talánov aquí estaba armado de pies a cabeza. Su teoría se había construido para la propagación de un haz intensivo de ondas electromagnéticas en el plasma. Mas ella contenía totalmente el cuadro principal: la formación de un canal guíaondas en cualquier medio, en el que el canal pueda ser apoyado por la acción del propio campo. Más tarde, elaboró una teoría muy general de este fenómeno y logró una serie de importantes resultados nuevos, de los que trataremos posteriormente. Ahora tenemos que atravesar el océano.

En ese mismo año que apareció el trabajo de Talánov, en la revista "Physical Review Letters", en la que se publicaban solamente los artículos considerados más urgentes por el autor y el redactor, apareció el artículo "El autoenfoque del máser óptico", de los autores R. Chiao, E. Garmire y Ch. Townes. El físico norteamericano Townes, uno de los fundadores de la electrónica cuántica y del máser, no emplea el vocablo "láser", prefiriendo la combinación de "máser óptico". No es asunto nuestro juzgar los debates terminológicos. Yo, igual que otros profanos, creo que no tienen sentido profundo, pues el láser y el máser óptico significan lo mismo. Es posible que aquí juegue su papel la cuestión de prestigio o algún otro motivo más esencial.

El artículo comenzaba así: "Más adelante examinaremos las condiciones bajo las cuales el rayo electromagnético crea para sí un guíaondas dieléctrico y se propaga sin difractar". Los autores desconocían el trabajo de Askarián; no obstante, más tarde, al enterarse de su existencia, reconocieron la prioridad de éste. A diferencia de Talánov, quien en su primer trabajo examinara

solamente el movimiento de la onda electromagnética en un canal plano, ellos calcularon el canal cilíndrico que surge en la inmensa mayoría de los experimentos realizados con los láseres. Este corto artículo encierra un examen profundo y claro de la esencia física de los dos procesos, capaces de provocar el autoenfoque y la canalización de la luz: de la electrostricción y el efecto Kerr.

Townes y sus colaboradores lograron calcular con qué potencia y en cuáles condiciones sería suprimida la divergencia difraccional del rayo para que éste resulte captado en el canal. Es cierto que el valor crítico de la potencia fue calculado teniendo en cuenta sólo la electrostricción. También constituía una restricción considerable el que los cálculos matemáticos se refirieran exclusivamente al estado en el que el rayo estaba ya capturado en el canal. La cuestión de cómo ocurrió esto y si era posible en general el proceso de capturación, quedaba fuera del examen matemático.

El artículo de Townes y sus colaboradores estimuló toda una serie de investigaciones. Por lo visto, P. Kelly fue el primero en examinar el proceso de disparo de un haz de luz originariamente paralelo y en establecer a qué distancia transcurre el autoenfoque después de penetrar la luz en un medio no lineal. Es curioso señalar que P. Kelly indica sus antecesores en el siguiente orden: Askarián, Talánov, Townes y sus colaboradores.

Kelly obtuvo sus principales resultados con ayuda de cálculos numéricos. Al poco tiempo, Talánov, así como los colaboradores de la Universidad de Moscú, S. A. Ajmánov, A. P. Sujorúkov y R. V. Jojlov, publicaron la solución analítica de ese mismo problema. No obstante, los

métodos aproximados, que hubo que aplicar para solucionar este complejísimo problema, perdían fuerza cerca del punto de disparo. La resolución numérica de Kelly tampoco decía nada sobre lo que ocurre con el haz cerca del punto de disparo y detrás de éste. La opinión expresada más tarde por Kelly, así como por Talánov, era la siguiente: el rayo láser detrás del punto de disparo se transforma en un hilo de luz muy fino y extraordinariamente intenso. Lo mismo escribían Townes y otros. Sólo Jojlov y sus colegas de la Universidad de Moscú admitían, que detrás del punto de disparo, es posible la formación de un guía de luz más complejo y peculiar, semejante a un hilo con sección transversal periódicamente variable.

Todos los trabajos teóricos ulteriores partían de que detrás del punto de disparo surge el régimen de propagación a guíaonda de la luz. Todos ellos estaban dedicados a precisar detalles aislados, a elevar la rigurosidad de los cómputos y a precisar los cálculos.

Todos los trabajos experimentales de aquellos años confirmaban las predicciones de la teoría. En ellos se comunicaba que detrás del punto de disparo se observa la propagación a guíaonda de la luz en forma de hilos muy finos. Los experimentadores competían en precisar los más pequeños detalles, en estudiar los diversos casos particulares y en elevar la precisión de las mediciones.

Todos coincidían en que esta rama de la electrónica cuántica estaba terminada en lo fundamental. Se escribieron los artículos y las monografías conclusivos. Poco a poco, los intereses de los investigadores se desplazaban hacia otras ramas de la ciencia.

El punto flaco

Como suele ocurrir con bastante frecuencia, el bienestar y la rutina van preñados de cataclismos. Tanto más inesperados son éstos, cuanto más sólido parece el edificio erigido. Pero los cataclismos nos señalan infaliblemente que debajo de los cimientos no hay bases lo suficientemente seguras. Bien si el fallo se descubre a tiempo. Entonces podrá liquidarse y continuar adornando e incrementando la torre.

No obstante, es necesario que se preocupe del asunto no un arquitecto esteta, sino un amante de lo sólido, que no desdeñe la lobreguez del terreno y lo ordinario de los cimientos.

En nuestra historia, por fortuna, apareció semejante individuo. Vladímir Nikoláevich Lugovói, joven colaborador del laboratorio de oscilaciones del Instituto de Física de la Academia de Ciencias y representante de la cuarta generación de la escuela de Mandelshtam, prestó atención al muy conocido punto flaco de la teoría del autoenfoque. En este punto, igual que en un foco, se reunieron todas las variantes de la teoría. La mayoría de los autores comprendía las dificultades que surgían al intentar describir exactamente el comportamiento de los rayos láser cerca del punto de disparo. Lo comprendían, mas ni siquiera intentaban examinar detalladamente lo que allí ocurría. Pues se veían obligados a limitarse a teorías aproximativas, las cuales decían distintas cosas.

De unas se deducía que, al acercarse a este punto, los rayos que antes se encorvaban hacia el eje, ahora iban acercándose a él con pendiente cada vez más suave. En otras teorías, estos rayos se rectificaban y penetraban en la región donde

la teoría perdía su validez, así que las continuaciones de todos los rayos debían reunirse en el punto de disparo, igual que en un foco. En las terceras... mas no vamos a profundizarnos en distintas variantes.

En ninguno de los casos quedaba claro cuál era el comportamiento de los rayos de luz allí donde los teóricos no pueden penetrar. ¿Qué ocurre con ellos más tarde? ¿Tal vez prevalezca la divergencia difraccional sobre los procesos no lineales allí donde los rayos convergen demasiado? ¿Es posible que entren en juego algunos procesos no considerados todavía?

Si los rayos van acercándose al eje cada vez en declive más suave, ¿convergerán en algún punto o pasarán suavemente al canal fino, como pensaba la mayoría? Y si los rayos, rectificándose, se clavan en el punto de disparo, igual que en el foco del lente, ¿por qué no divergen detrás del foco? ¿Tal vez sea posible que allí se encorven de nuevo y entren suavemente en el canal estrecho? ¿O es que detrás del foco los rayos, en realidad, divergen para reunirse de nuevo en el foco siguiente?

Los experimentos realizados por primera vez con toda seguridad por R. Chiao, E. Garmire y Townes, descubrieron un canal estrecho que formaba el rayo al recorrer en el medio precisamente por aquel camino que le predecía la teoría. Los experimentos ulteriores dieron, en la mayoría de los casos, resultados análogos. Verdad es que en ciertas condiciones brotaban algunos retazos de hilos luminosos, que se podían interpretar a favor de la hipótesis de los canales que se estrechan periódicamente.

El cuadro se complicaba extraordinariamente cuando se aplicaban potencias muy grandes.

En vez de un canal estrecho, surgían varios, y, a voces, surgían muchísimos de esos hilos. Los experimentadores ponían experimentos que eran excepcionales por la finoza de la idea y por su ejecución. Observaban lo que jamás les hubiese venido a la cabeza a Newton, a Faraday o a Fresnel, los reyes de la óptica. En aquellos años no podían ni suponer que fuese tan profundo el océano de los misterios de la luz.

Mas todos estos hallazgos de los experimentadores no desconcertaron a los teóricos contemporáneos. En los medios no lineales pueden ocurrir también otras cosas. La teoría demostró convincentemente que ya en las etapas precoces del enfoque, el haz inicial puede desintegrarse en varias partes, que tienden hacia distintos campos. En los artículos comenzó a aparecer la palabra mágica de "inestabilidad". Efectivamente, de ecuaciones más precisas se deducía que, aplicando potencias muy grandes, los haces comienzan a ser inestables y tienden a desdoblarse en hilos sueltos. Parecía que todo iba bien, mas... ¿qué sucedía, a pesar de todo, con los haces cerca del punto de disparo?

Lugovói no estaba satisfecho con la idea, universalmente admitida y basada en el experimento, de que allí, sin duda alguna, surge un canal estrecho. A él no le complacía esa "sin duda alguna", ese postulado que había que creerlo a pie juntillas, igual que el postulado sobre el paralelismo en la geometría euclidiana.

Más de dos mil años estuvo la geometría, así como la física algo más tarde, basándose en este postulado. Hasta que aparecieron hombres que se negaron a creerlo a pie juntillas. "¿Qué pasaría si nos negáramos de este postulado?" — se pre-

guntaron. "¿Podría pasarse sin él?" "Es imposible" — respondió la severa matemática.

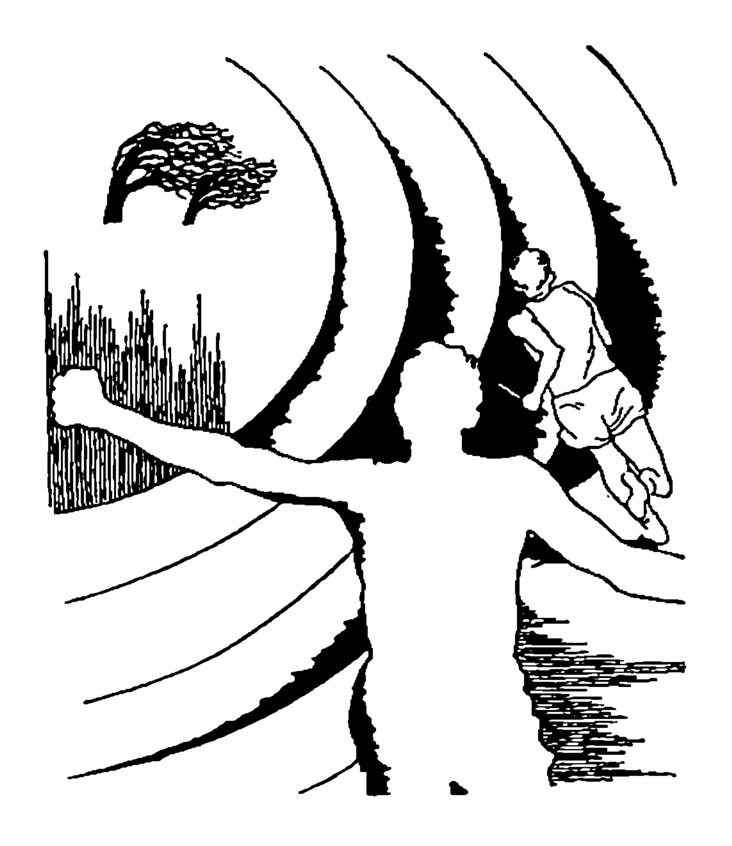
"Pero, ¿quizá sea posible sustituirlo por otro?" — insistían los criticones. "Hagan la prueba" — se conformaba la matemática.

Y ellos hicieron la prueba, Lobachevski y Riemann. Y crearon dos geometrías nuevas. Dos geometrías no euclidianas. Trabajaban independientemente, y por lo visto, por casualidad, eligieron distintas posibilidades de las dos existentes: las líneas paralelas convergen en la infinidad, o las líneas paralelas divergen en la infinidad. Ambas variantes son tan lícitas como lo es el postulado de Euclides.

En la actualidad, la geometría no euclidiana es parte de las matemáticas, que goza de todos los derechos y es un instrumento seguro de la física. El Universo, que está estudiándose en escala ingente, no puede describirse con ayuda de la geometría euclidiana. Cerca de las grandes masas, las desviaciones con respecto a ésta se notan incluso cuando las distancias son relativamente cortas. Esto lo estableció Einstein, autor de la teoría de la relatividad, y lo confirmó después el experimento.

Pero si hasta un postulado puramente geométrico puede resultar sólo un caso especial y particular, ¿cómo es posible reconciliarse con el postulado en la teoría física?

Y Lugovói informó sobre sus dudas al mismo seminario, ante el cual había expuesto Askarián cinco años antes su idea referente al autoenfoque y la autocanalización de la luz. Lugovói prestó atención a que los métodos analíticos aproximados, basados en las suposiciones sobre la forma invariable del haz, no pueden dar un cuadro justo detrás del punto de disparo. Demostró que



al propagarse un intenso haz luminoso en un medio no lineal, su forma varía sustancialmente.

El artículo de Lugovói que contenía estas ideas y los resultados, apareció en 1967 en la revista "Informes de la Academia de Ciencias de la URSS". Pero en todos los trabajos experimentales, que seguían apareciendo hasta el año siguiente, se comunicaba que detrás del pun-

to do disparo del haz se observaba una propagación a guíaonda de luz en forma do hilos muy finos y brillantes.

La respuesta de la computadora

Prójorov fue el único que apoyó a su joven colaborador. El mismo se incorporó a estas investigaciones e hizo que A. L. Dishkó, joven especialista en matemática computadora, participara en ellas. Debido a que los métodos analíticos aproximativos resultaron ser inservibles, hubo que recurrir a la ayuda de la computadora electrónica. Les esperaba un trabajo muy complicado y arduo.

Decidieron renunciar a las hipótesis preconcebidas acerca del destino del haz detrás del punto de disparo. A la computadora se le plantearon ecuaciones que describían el problema más simple: en el límite plano de una sustancia, de la que sabemos que en ella se observa el efecto cuadrático de Kerr, incidía un haz de luz. La computadora debía determinar qué sucedía con este haz a medida que iba penetrando en el interior de la sustancia.

Pueden imaginarse con cuánta emoción los experimentadores esperaban los resultados que deberían aparecer en las entrañas electrónicas de la computadora BESM-6.

Después de funcionar el tiempo necesario, la computadora comunicó. on estas condiciones no hay régimen a guíaonda. Detrás del punto de disparo se forma cierto número de focos, es decir, zonas con concentración muy alta de energía y dimensiones extraordinariamente pequeñas.

¡La respuesta no sólo discrepaba radicalmen-

te con todas las variantes de las teorías existentes, sino que contradecía a todos los datos experimentales existentes!

Había motivo para dejarse abatir. Pues ellos esperaban obtener un cuadro estricto y seguro del paso desde el autoenfoque paulatino, a través del punto de disparo, al hilo fino. Pero no había error. Las ecuaciones eran correctas y la computadora funcionaba bien.

Entonces le plantearon a la computadora el segundo problema, que respondía más exactamente a las condiciones de la mayoría de los experimentos. Antes de caer en un medio no lineal, el haz de luz pasa previamente por un lente convergente. La computadora resolvió también estas ecuaciones.

La respuesta era la misma. Ningún hilo. Una cadenita de focos aislados.

¿Qué ocurre? ¿Será posible que el planteamiento del problema no concuerde en algo con la realidad? ¿Será posible que la cadenita de focos sea el resultado de que, entre toda la variedad de fenómenos, solamente el efecto Kerr se tenga en cuenta al efectuar el cálculo? Es muy probable también la suposición siguiente: el surgimiento de hilos finos no se produzca por el efecto Kerr, sino por algún otro proceso.

Las ecuaciones se complicaron más. Ahora reflejaban también la acción de la dispersión de combinación estimulada: fenómeno bien estudiado, que se manifiesta sobre todo en los casos de grandes intensidades de luz, y conocido como una de las causas del autoenfoque.

De nuevo las horas de espera frente a la computadora. Y una nueva respuesta. ¡La estructura multifocal debe existir! La consideración de la dispersión de combinación estimulada conduce

sólo a la alteración de las magnitudes numéricas. El canal estrecho no surge tampoco en este caso.

Parecía que quedaba el único camino. Revisar, uno por uno, todos los efectos que sean capaces de conducir a la formación de canales finos. Escribir ecuaciones nuevas que, probablemente, fueran cada vez más complejas. Y entregarse confiados a la fuerza de la computadora. Es posible que se descubra un efecto que responda por propagación a guíaonda de la luz, por la formación de hilos finos muy relucientes.

Se necesita una gran intuición para poder elegir otro camino. Rechazar la evidencia de los numerosos experimentos. Rehusar el encanto de las teorías universalmente reconocidas. Abandonar la senda trillada.

Prójorov y Lugovói decidieron examinar de manera nueva las respuestas de la computadora. No como un error, ni tampoco como el resultado de una elección errónea de los datos físicos iniciales, sino como una conclusión correcta, correspondiente a un problema planteado en una forma demasiado simplificada. Pues el impulso gigante del láser dura un instante; mejor dicho, unas decenas de nanosegundos o, hablando de modo más sencillo, varias centésimas partes de una millonésima de segundo. Y ellos le planteaban a la computadora problemas, en los cuales los haces de luz actuaban ininterrumpidamente con potencia constante. Y en dependencia de esta potencia obtenían diferentes distancias hasta la multitud de focos.

¡Ahí está la causa! Durante el destello gigante del láser, la potencia de la luz varía desde cero hasta una magnitud enorme. En este caso, las distancias hasta los focos no pueden ser cons-

tantes. Deben variar junto con el aumento de la potencia. ¡Los focos deben desplazarse!

¡Focos movedizos!

Sí, focos movedizos. He aquí la adivinación del misterio. ¿Será posible que se desplazan tan rápidamente que, tanto para los ojos como para los aparatos, se perciban en forma de un brillante hilo continuo?

Los nuevos y complicados cálculos justificaron las esperanzas. ¡Sí, desde luego, los focos se mueven! En condiciones características para la mayoría de los experimentos realizados en distintos laboratorios, los focos vuelan a una velocidad de casi mil millones de centímetros por segundo. ¡Una velocidad que es tan sólo treinta veces menor que la de la luz!

No es de extrañar que la trayectoria de su movimiento tenga el aspecto de un hilo brillante.

De nuevo había que concederle la palabra al experimento. Pero a un experimento efectuado en completa concordancia con las condiciones, para las cuales Prójorov y sus colaboradores lograron formular el problema y realizar los cálculos correspondientes.

El primer comunicado de que los finos hilos brillantes, observados de costado, representan la huella de los focos movedizos, fue el fruto del trabajo conjunto de V. V. Korobkin, colaborador de Prójorov, y de A. Allok realizado en los EE.UU., donde Korobkin trabajó durante varios meses. Después, M. Loy e Y. Shen comunicaron que, como resultado de las más escrupulosas investigaciones realizadas de acuerdo con las condiciones de la teoría de Prójorov y sus

colaboradores, no habían descubierto la propagación a guíaonda de la luz, pero que observaron focos movedizos. Por fin, Prójorov junto con R. V. Serov, M. Y. Schelev y Korobkin, que había regresado ya a la Unión Soviética, no sólo observaron los focos movedizos, sino que midieron también su velocidad. Esta coincidía perfectamente con las predicciones de la teoría.

Parecía que ya era suficiente, pero Prójorov y Lugovói siguieron trabajando. Junto con A. A. Abrámov, lograron demostrar que no sólo los impulsos gigantes, sino que también otros impulsos mil veces más cortos, que suelen denominarse ultracortos, forman focos movedizos.

Hagamos un resumen. Se ha establecido de manera sólida, tanto teórica como experimentalmente, que el potente impulso del láser, incidente sobre un medio en el que es posible el efecto Kerr, se autoenfoca. Como resultado, surge una cadenita de focos que se desplazan a una velocidad muy grande en dirección al láser.

¿Y qué sucede con los hilos finos y con la autocanalización de la luz y su propagación a guíaonda, que había predicho Askarián? ¿Qué hacer con las numerosas teorías de autores venerables? ¿Cómo aceptar todos los experimentos que confirmaron esas teorías?

No soy yo quien ha de solucionar tales problemas, pues los hechos son tozudos. Pero es importante también la interpretación de los hechos.

Los focos movedizos se convirtieron en una realidad objetiva. Ellos existen, y se han establecido con precisión las condiciones de su existencia.

Es evidente también que la teoría de la propagación a guíaonda de la luz no está terminada

todavía. Se conocen sus puntos flojos. Tampoco está excluido que los cálculos, análogos a los realizados por Dishko, Lugovói y Prójorov, factibles para condiciones más complejas y correspondientes a la mayoría de los experimentos realizados anteriormente, conduzcan a los hilos o a un conjunto de hilos, y no a los focos movedizos, correspondientes a condicionos más simples.

La historia no ha concluido todavia. Es imposible adivinai quién y dónde dará el siguionte paso, el paso decisivo. Pero no me cabe la menor duda de quo sorá un hombre o un grupo de hombres quienes se decidan a criticar intrépidamonte las teorías reconocidas en todo el mundo, como lo hicieron Askarián y Lugovói, y que tengan el sontido de lo nuevo y la profunda intuición do Prójorov. En una palabra, serán hombres que no temerán ir contra la corriente.

CAPITULO IV

EL COLUMPIO

Un láser engendra otro láser

Nuestras insuficiencias no son más que la continuación de nuestros méritos. Cuán frecuente es esta variante cotidiana de la gran ley de unidad de las contrariedades. Su esfera de acción es ilimitada. Y la fuerza consiste en que en ella está la posibilidad del desarrollo infinito. Pues si el mérito es inseparable de las insuficiencias, resulta que en éstas se encierran también los méritos ocultos. Sólo es menester saber descubrirlos y desarrollarlos.

En comparación con las habituales fuentes de luz, todas las ventajas de los láseres se deben a que en éstos se combinan indisolublemente las propiedades cuánticas de los átomos, de los iones o de las moléculas con el principio radiotécnico de la reacción. Semejante combinación garantiza a la radiación del láser una alta ordenación, tanto en espacio como en tiempo, o, como dicen los físicos para abreviar, una alta coherencia. Precisamente la coherencia es la que permite dirigir toda su emisión a superficies pequeñas, cuyas dimensiones son conmensurables con la longitud de onda de la luz. En su rayo, comprimido hasta dimensiones micrónicas, la densidad de la energía es tan alta, que ninguna sustancia es capaz de hacerle frente. Aquí son impotentes las ideas de la óptica vieja.

La coherencia facilita a los láseres rivalizar en estabilidad con las mejores normas cuánticas para las frecuencias del radiodiapasón. Pero la estabilidad, la constancia de su frecuencia, no

siempre es una cosa buena. Los espectroscopistas, químicos, biólogos y especialistas de muchas ramas de la ciencia y la técnica soñaban con un láser, cuya frecuencia se pudiera variar, igual que un operador de radio, mediante un giro de la manecilla, obliga a su transmisor a trabajar en la frecuencia más conveniente.

Muchos dicen que la parte más interesante de la óptica moderna es la óptica no lineal. Esta afirmación, por lo visto, es justa, ya que la óptica no lineal comenzó a ser accesible para todos solamente con la aparición de los láseres, mientras que la óptica lineal ordinaria no tiene menos de 300 años, y posiblemente que tenga más de dos mil. Es difícil encontrar algo nuevo en un terreno que esté traspalado a tanta profundidad. No hay nada de extraño, que todo lo referido en la segunda parte del presente libro esté relacionado, de una u otra manera, con la óptica no lineal, óptica de los campos luminosos concentrados hasta el máximo.

En la era anterior al láser, los ópticos trataban sólo con campos muy débiles, y para observar los fenómenos no lineales había que construir aparatos muy sensibles. Examinando esta situación, el académico Vavílov, quien introdujo en la ciencia el término "óptica no lineal", escribía: "Los físicos se han acostumbrado tanto a la linealidad de la óptica habitual, que hasta el momento no hay incluso un aparato matemático, clásico y formal, para solucionar problemas ópticos reales "no lineales".

Con la aparición de los láseres, y principalmente láseres con factor de calidad del resonador controlado que generan impulsos gigantes de luz con potencia de miles de millones de vatios, resulta que los fenómenos no lineales ad-

quieren una gran importancia que a veces es decisiva, y no sólo para la física, sino también para las aplicaciones técnicas. Dicho sea de pasada, precisamente el miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS, Rem Víktorovich Jojlov, y su colaborador, el profesor Serguéi Alexándrovich Ajmánov, escribieron la primera monografía en esta rama, resumiendo y desarrollando considerablemente en ella la teoría y el aparato matemático que había mencionado Vavílov. Por lo demás, cuando estaban escribiendo la monografía, eran ocho años más jóvenes y no tenían aún títulos científicos tan altos.

En los párrafos anteriores ya hemos empleado varias veces la expresión de "fenómenos no lineales". A veces es imposible evitar los términos científicos. No obstante, los términos especiales, incluyendo también los científicos, no empeoran el lenguaje. Por el contrario, lo hacen más sencillo, más claro y le permiten alcanzar brevedad. Una o dos palabras sustituyen a una frase entera y a veces, hasta varias.

Imaginémonos, por ejemplo, el gráfico de movimiento de un tren que se mueve a una velocidad constante. Representando el espacio recorrido por el tren en un lapso de tiempo, obtendremos una línea recta. Omitiendo la palabra "recta", el físico habla de la "ley lineal del movimiento", teniendo en cuenta que el espacio recorrido es proporcional al tiempo. Si el gráfico representa el espacio recorrido por una piedra que cae libremente, no veremos en él una recta, sino una línea encorvada. Sin entrar en detalles y sin precisar la forma real de esta curva, el físico dirá que no es rectilínea. Para abreviar, dice: no es lineal. Esto significa que el espacio recorrido

por la piedra que cae no es proporcional al tiempo; el espacio está relacionado con el tiempo mediante una dependencia no lineal.

En el aire, en el vidrio, en el agua y en la mayoría de los medios conocidos, el espacio recorrido por la luz es proporcional al tiempo. Por consiguiente, la velocidad de la luz en estos medios es constante. Para la mayoría de las sustancias esto es justo para todas las intensidades alcanzables de la luz, incluso para los haces de los generadores ópticos cuánticos. Pero hay un pequeño número de cristales en los que la velocidad de la luz varía en dependencia de su fuerza. Es más, esta dependencia varía al cambiar la dirección de la luz con relación a las aristas del cristal y sus caras. Semejante ley de propagación de la luz es natural llamarla no lineal. A veces, la palabra "no lineal" se refiere al propio cristal, teniendo en cuenta que la ley de propagación de la luz en éste se distingue de la lineal.

En la radiotécnica hace tiempo que se utilizan las dependencias no lineales de la corriente en función de la tensión, que se observan en las lámparas de radio y en los aparatos semiconductores. Estos sirven, por ejemplo, para multiplicar las frecuencias. Esto significa que teniendo un generador de tubos termoiónicos con una frecuencia determinada, es posible, sin cambiar nada en el generador, obtener oscilaciones de frecuencias dos, tres y hasta diez veces mayores.

Como es natural, después de crear los generadores ópticos cuánticos, los físicos decidieron obtener algo semejante también en la óptica. Pues hasta el momento, potentes generadores cuánticos trabajan solamente en dos longitudes de

ondas: los generadores cuánticos con iones de neodimio generan ondas infrarrojas con longitud de cerca de un micrón, y los generadores a rubí con iones de cromo emiten luz roja con longitud de onda de 0,69 micrones aproximadamente. Mientras tanto, duplicando la frecuencia del generador de neodimio, es decir, reduciendo su onda dos veces (hasta 0,5 micrones), puede obtenerse luz verde. Y si se triplica la frecuencia, podrán obtenerse rayos ultravioletas con una longitud de 0,33 de micrón. ¡Y no son unos rayos cualesquiera, sino casi ideales! ¡Un láser engendra otro láser!

Un resultado análogo se obtiene mediante la multiplicación de la frecuencia del generador a rubí. Su segundo armónico cae en la parte violeta del espectro, mientras que el tercero genera rayos ultravioletas duros.

Dejando pasar el haz del generador cuántico a través de unos cristales especialmente cultivados, Francken y sus colaboradores fueron los primeros que lograron registrar la aparición de radiación de frecuencia doble, aunque el coeficiente de conversión era muy bajo. Sólo una parte ínfima de energía de la onda incidente se transformaba en energía de la onda de frecuencia doble. Jojlov y sus colaboradores analizaron profundamente el nuevo fenómeno y comprendieron que la causa estaba en la diferencia de las velocidades de ambas ondas. Como resultado, las acciones de los distintos sectores del cristal no se adicionan, sino que llegan a anularse parcialmente. Pero las ecuaciones le sugirieron a Jojlov una salida de la situación. Resulta que en el cristal puede haber direcciones en las que la onda incidente y la onda de frecuencia multiplicada corren a unas velocidades a las que todos

los puntos trabajan de común acuerdo y los resultados de sus acciones se suman. En este caso, la mayor parte de energía de la onda incidente se transforma en energía de la onda de frecuencia multiplicada. Así fueron construidos generadores ópticos de armónicos bastante eficaces.

Una piedra caída del cielo

Después de releer el párrafo anterior, comprendí que había pasado por alto lo más interesante. Aquí todo era correcto. ¡Sí, las ecuaciones lo sugirieron! Pero mientras que éstas no estén escritas, la frase carece de verdadero sentido, mas no está aceptado escribir ecuaciones en un libro de divulgación científica como éste. Volviendo un poco más atrás, yo leí: "En la radiotécnica hace tiempo que se utilizan...", "Los físicos decidieron..." ¡Con qué facilidad se dice!

En realidad, no todo fue tan fácil de hacer. La radiotécnica dictó solamente el objetivo. Por mucho que se alumbre con el láser una lámpara de radio, un diodo o un transistor, no se obtendrá el armónico luminoso. Desde luego, los físicos ni intentaban hacer cosa tan absurda. A ellos les protegía lo que generalmente denominan intuición física, o, en realidad, la capacidad de utilizar la experiencia anterior en situaciones nuevas. Esta capacidad emana de la profunda comunidad de las leyes de la naturaleza y de la unidad de los métodos matemáticos de la descripción de la naturaleza. En el caso dado, se trata de la teoría de oscilaciones no lineal elaborada, principalmente, por los científicos de las escuelas de Mandelshtam y Papaleksi, de

Krilov y Bogoliúbov. Dicho sea de paso, Jojlov y Ajmánov pertenecen a la tercera generación de la escuela de Mandelshtam y Papaleksi, generación que hemos mencionado más de una vez.

Los acústicos ya hace tiempo que tropiezan con los fenómenos no lineales en los procesos ondulatorios. Ahora nos causan disgustos los ruidos atronadores que surgen cada vez que un avión rompe la barrera sónica. La cuestión consiste en que el sonido es una onda de compresión y rarificación del aire. Mientras el sonido es suave, éste corre por el aire sin distorsión. Sólo por eso podemos hablar y gozar de la música. Pero cuando el sonido es demasiado fuerte...

Allí donde el aire está comprimido, la velocidad del sonido es mayor que en los sitios de rarificación. Por eso algunos sectores de una onda sonora fuerte alcanzan a otros sectores. Las ondas sonoras suaves se deforman. En ellas surgen frentes abruptos, semejantes a las crestas verticales del oleaje, que aumentan a medida que las olas del mar van aproximándose a un banco de arena. Tales frentes de las ondas sonoras, distorsionados y crecientes, cuya velocidad en el aire es mucho mayor que la de los sonidos habituales, son precisamente aquello con lo cual alarma la aviación supersónica.

Para los ópticos, lo más importante de todo lo dicho es que el avión que vuela a una velocidad mayor que la del sonido, no excita onda de choque, como tampoco aparece ésta a una velocidad subsónica. Surge únicamente cuando la velocidad del avión se aproxima a la velocidad del sonido. Sólo en estas condiciones, el sonido excitado por el avión en vuelo, durante muchos períodos de la onda sonora, amplifica a ésta

más y más. En este caso, casi toda la energía de los motores del avión se transforma en energía de las ondas sonoras. Los motores deben tener gran reserva de potencia para poder arrancar al avión de las ondas sonoras acompañantes, que succionan la energía, para romper la barrera del sonido, adelantar a las codiciosas ondas y eliminar el sincronismo, por cuya culpa el aparato está obligado a soportar masas de aire que suponen pesadas trabas para él.

Si el aviador, sin ambicionar a la velocidad, tratase de asemejar su aparato a la retumbadora carroza de Elías el Profeta, tendría que volar exactamente a la velocidad del sonido.

Eso es el objetivo que se planteaban precisamente los físicos: la fase del rayo láser deberá correr por un medio a la misma velocidad que la fase de la onda que él mismo genera del segundo o tercer y hasta más alto armónico. Aquí tenemos que emplear el vocablo "fase" para no causar molestia a los que están acostumbrados a esta palabra. Aquellos que prefieren pasar sin ella, pueden continuar pensando en la onda como tal, teniendo en cuenta la cresta de una onda simple, cuya forma coincide con la sinusoide que todo escolar conoce.

El problema de asegurar la igualdad de velocidades de desplazamiento de las fases — sincronismo de fase — se complica debido a la existencia de la dispersión, fenómeno descubierto por Descartes y estudiado detalladamente por Newton. La dispersión se manifiesta en que la velocidad de la luz, en cualquier medio real, depende de su frecuencia y, por tanto, de la longitud de onda correspondiente. La existencia de la dispersión condujo a Newton a la conclusión de la inevitabilidad de las distorsiones ópticas

(a las que denominó aberración cromática) en los telescopios de lentes. La conclusión errónea obligó al sabio a pasar a los telescopios de espejos.

Parecía que la existencia de la dispersión imposibilitaría la multiplicación eficaz de la frecuencia de luz. Efectivamente, en medios transparentes corrientes, como, por ejemplo, los gases, líquidos y vidrios, la velocidad de la luz disminuye al aumentar la frecuencia. Esto significa que en estos medios las fases de dos ondas, cuyas frecuencias se diferencian el doble o el triple, no pueden desplazarse con la misma velocidad. Por consiguiente, es imposible el sincronismo necesario para convertir exitosamente la energía de la onda incidente en energía de armónico. Así es cómo surgió un atolladero en la óptica no lineal cuando se intentó utilizarla por primera vez en la práctica.

La historia se repite, pero, afortunadamente, no siempre es aplicable la famosa observación de Marx de que la primera vez es una tragedia y la segunda, una farsa. El error de Newton lo descubrió el eminente matemático Euler, quien dedujera teóricamente la posibilidad de excluir la aberración cromática de los lentes. El no logró plasmar esto en la práctica, pero el óptico inglés Dollond, después de varios años de tenaz búsqueda, construyó un lente complejo que unía en sí dos lentes, hechos de distintas clases de cristal con diferentes leyes de dispersión, y, de este modo, logró que las distorsiones en uno de ellos eliminasen las distorsiones en el otro. Así, como resultado de la compensación mutua, se obtiene la imagen sin distorsión. Ahora los objetivos de todos los telescopios, prismáticos y anteojos se construyen precisamente de ese modo.

Por vía semejante se logró salir también del atolladero en el que se vio la óptica no lineal. Los físicos norteamericanos J. Giordmaine y R. Terhune prestaron atención a que la condición del sincronismo podía cumplirse en los cristales birrefringentes. La birrefringencia, como es sabido, fue descubierta hace poco más de trescientos años por E. Bartholinus. El descubrió que el rayo de luz, al caer sobre la superficie de un cristal de espato de Islandia, se desdobla; además, cada una de sus partes se refracta de distinto modo. Una de ellas se somete a la ley de refracción descubierta por Descartes y la otra, no.

Lo principal es que exista el hecho, la explicación ya se hallará. Es posible que así pensaran en los tiempos de Bartholinus y éste encontró la explicación. Consideró que en los cristales de espato de Islandia había poros que captaban el segundo rayo (Bartholinus lo llamó móvil) y le impedían subordinarse a la ley. Verdad es que no se lograba descubrir estos poros, mas tampoco se encontraba otra explicación. Incluso el gran Newton no pudo decir nada determinado en cuanto a esto. El comenzó su "Optica" fundamental con la orgullosa renuncia a las hipótesis:

"Mi intención en este libro no es explicar mediante hipótesis las propiedades de la luz, sino la de exponer y demostrarlas por medio de razonamientos y experimentos".

Pero cuando llegó a la suposición de Bartholinus, tuvo que introducir la hipótesis de que los corpúsculos luminosos poseen dos lados y que su refracción depende del lado con que ellos

chocan. Quedó sin explicar por qué esto se manifestaba solamente al chocar contra el cristal de espato de Islandia, mientras que en otros casos no se observaba.

Verdad es que en ese mismo año en que apareció la "Optica" de Newton, Huygens logró explicar que la aparición de dos ondas se debía a que en el espato de Islandia (él lo llamaba cristal de Islandia) existen dos velocidades de luz. Y Huygens tuvo que introducir la hipótesis de que en el cristal hay dos materias distintas, que sirven a "ambos tipos de refracción". Pero Huygens siente que esta explicación no es suficiente y, "dejando que otros investiguen esta cuestión", pasa a examinar la forma extraordinaria del cristal. Unicamente Fresnel, quien se atrevió a reconocer que la luz eran ondas transversales, pudo explicar, sin contradicción, el fenómeno de la polarización.

No obstante, volvamos al asunto de Terhune. Este demostró que en los cristales birrefringentes las condiciones del sincronismo pueden ser cumplidas si se utilizan dos ondas que tengan distinta polarización.

Si en los experimentos de Francken, en ausencia de sincronismo, incluso un potente impulso de láser excitaba solamente la onda débil del segundo armónico, con la presencia de sincronismo cambiaba totalmente la situación. La cosa consiste en que el sincronismo ondulatorio conduce a la acumulación de energía en la onda del segundo armónico. Por eso aun la emisión del láser a mezcla de helio y neón, que es de baja potencia, permite en estas condiciones obtener un resultado considerable.

Mas el lector puede decirnos: ¡Alto! Si es que la presencia de sincronismo permite utilizar fuen-

tes de luz de baja potencia, ¿tal vez sería posible obtener la multiplicación de frecuencias de las fuentes de luz habituales? La lógica nos dicta una respuesta positiva, mas la física conduce a la negativa.

La cuestión consiste en que el sincronismo con precisión se efectúa solamente a lo largo de una dirección fija en el cristal. Si nos apartamos un poquito hacia un lado, el efecto de acumulación desaparece. Y las fuentes que no sean láseros generan sólo haces divergentes. La potencia que fluye con estos haces estrictamente a lo largo de una recta cualquiera equivale, prácticamente, a cero. Por consiguiente, es también igual a cero la potencia del armónico. La situación empeora asimismo debido a que la dirección del sincronismo depende en gran parte de la frecuencia de la luz, y es que la franja de luz generada por una fuente corriente es mucho más ancha que el rayo de láseros. Como resultado, se reduce más aún la energía que fluye en sentido elegido del cristal desde la fuente que no sea de láser.

La multiplicación de frecuencia de emisión de láser permite enriquecer la paleta de la luz coherente. No obstante, así no se logra un reajuste suave de frecuencia ni un cambio suave del color de la radiación láser.

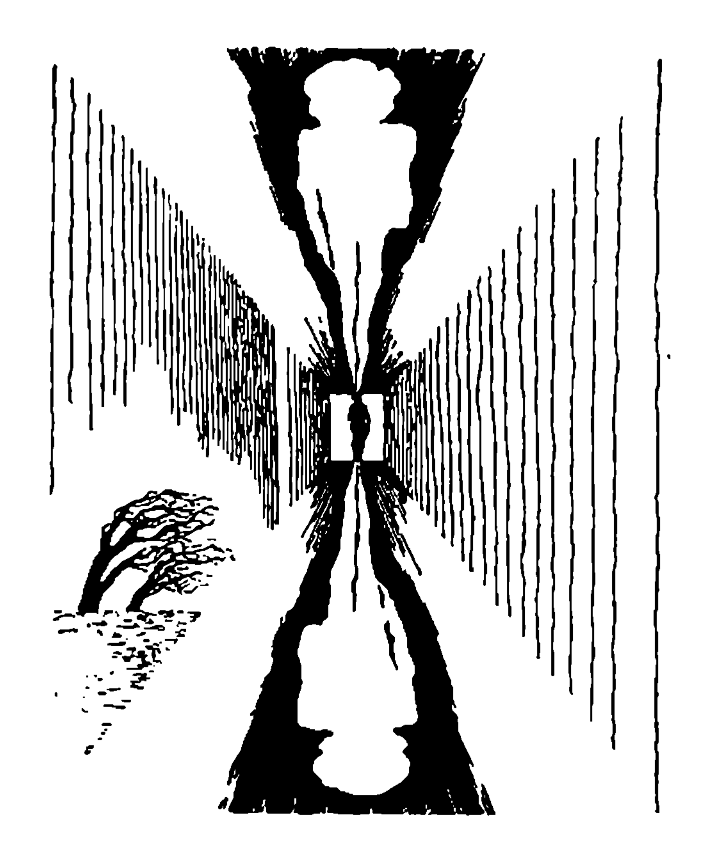
Tal posibilidad la hallaron Jojlov y Ajmánov. Ellos utilizaron el hecho, acabado de mencionar, de la dependencia que existe entre el sentido del sincronismo en el cristal y la frecuencia, y también el método de la generación paramétrica, elaborado por Mandelshtam y Papaleksi para el radiodiapasón a base de la teoría no lineal de oscilaciones.

El columpio

Las cosas y los fenómenos, a los que estamos acostumbrados desde la infancia, nos parecen que se sobreentienden. Pero entramos en la juventud, la época de las dudas, y a la infancia, junto con el calificativo "feliz", le agregamos otro calificativo totalmente desagradable: "boba".

Después de estudiar las leyes de Newton, no podemos comprender ya cómo puede columpiarse uno. El columpio lanza un reto a las leyes newtonianas. Posiblemente que en Inglaterra, trescientos años atrás, desconociesen este entretenimiento. De lo contrario, es difícil comprender cómo la inteligencia penetrante de Newton no se dio cuenta de esta paradoja. ¡Pues las fuerzas internas no son capaces de desplazar el centro de inercia! Así surge la repercusión al disparar. El cohete avanza única y exclusivamente porque los gases salen de la tobera hacia atrás a una velocidad enorme. El centro de gravedad del cohete, determinado antes de lanzar el artefacto, queda para siempre en la rampa de lanzamiento. Y como el cohete vuela, el columpio debe permanecer inmóvil... si es que en la naturaleza no existiese algo desconocido para Newton.

Los niños descubren este "algo" sin tomar conciencia aún de lo que significan los vocablos "ciencia" y "física". Montan en el columpio y, haciendo movimientos rítmicos — doblando y enderezando las rodillas —, se balancean cada vez más fuerte, hasta que se lo permitan las fuerzas o la valentía. Esto se logra porque los niños son muy impacientes, comienzan a columpiarse inmediatamente que se montan en el columpio. Sólo una vez pude observar cómo una



rizosita coquetona estaba muy angustiada porque, habiendo saltado al asiento, estuvo mucho tiempo fastidiando a sus admiradores y luego no podía columpiarse por mucho que se agachara. Ella se retorcía, saltaba y se esforzaba, mas todo era en vano. Le estorbaba la ley de Newton. Y sólo después de que su caballero le dio un empujoncito, pudo marchar la cosa.

El columpio es un péndulo. Hay que empujarlo, de lo contrario quedará inmóvil. Así es la naturaleza. Pero cuando comienza a moverse aunque tan siquiera sea un poquito, la naturaleza no obstaculiza al deseo de la niñita de columpiarse más fuerte. Sólo hace falta captar el ritmo y acuclillarse, para enderezarse después en los momentos precisos. Si se acuclilla cuando el columpio se encuentre en el punto más alto, y se endereza cuando éste pasa rápidamente por la posición inferior, la amplitud aumentará cada vez más. Sin embargo, si te equivocas de ritmo, desaparecerá la sensación cautivadora de vuelo.

Columpiando a su amiguita, que está sentada pasivamente en el columpio, el muchacho no tiene que pensar en nada. Pero se necesitaron siglos para comprender cómo se columpia ella misma. Los físicos llaman a ese proceso excitación paramétrica de las oscilaciones. El principal parámetro del péndulo (y del columpio, claro está), es la longitud de la suspensión. Esta determina el período de oscilación. El período de un péndulo largo es mayor que el período de un péndulo corto. La longitud de la suspensión se cuenta desde el punto de suspensión hasta el centro de gravedad del peso. En el caso del columpio, el centro de gravedad se encuentra cerca de la cintura del que está columpiándose.

Doblando y desdoblando las rodillas, el hombre varía la posición del centro de gravedad, es decir, la longitud de la suspensión. Al enderezarse, realiza un trabajo contrario a las fuerzas de gravedad. Al relajar los músculos, permite a la fuerza de gravedad que doble sus rodillas. Cuando el columpio está inmóvil, esto no da resultado alguno. Si la longitud de la suspen-

sión es constante, tampoco habrá otro modo de mecer el columpio más que empujándolo desde afuera.

Otra cosa es si el columpio está moviéndose tan siquiera un poquito. Al enderezarse en el punto inferior, el hombre realiza un trabajo no sólo contrario a la fuerza de gravedad, sino que también contrario a la fuerza centrífuga. En el punto superior, cuando el columpio queda inmóvil por un instante, la fuerza centrífuga desaparece y sus rodillas las dobla sólo la fuerza de gravedad. El trabajo que realiza el hombre en el columpio en movimiento es mayor que el que realiza en otro que está inmóvil.

Ahora ya sabemos de dónde se coge la energía necesaria para mecer el columpio. Pero quedó sin solucionar el problema principal: ¿Cómo se balancean? Pues la fuerza del hombre que endereza las piernas está dirigida en dirección vertical, mientras que el incremento de su velocidad en este momento está dirigido en dirección horizontal, transversalmente a la dirección de la fuerza.

La paradoja surge porque, al intentar aplicar las leyes de Newton al columpio real, continuamos pensando en éste como en un péndulo ideal con suspensión de longitud constante. El físico diría como en un sistema con un solo grado de libertad, teniendo en cuenta que en el péndulo ideal puede variar solamente una característica: el ángulo entre la suspensión y la plomada. La plomada aquí, desde luego, está llamada a designar solamente la línea vertical.

Pero como ya hemos señalado, en el columpio real varía también la longitud de la suspensión. Lo que en el péndulo ideal era un parámetro invariable, es para el columpio el segundo

grado de libertad. Y es esencial que en el caso del columpio ambos grados de libertad están relacionados entre sí. Pueden intercambiar energía. La energía consumida por el hombre para variar la longitud de suspensión, puede convertirse en energía de oscilaciones corrientes del columpio. Lo importante aquí es que el hombre trabaje. Si se pone a enderezarse cuando está ascendiendo y a doblar las rodillas en el punto inferior, resulta que no hará otra cosa que quitarle energía al columpio en movimiento y apagará sus oscilaciones.

Lo expuesto aquí no suena de manera muy convincente, ni parece muy lógico desde el punto de vista del sentido común. Pero también desde ese punto de vista es absurda la afirmación del físico de que el atleta no realiza trabajo alguno al sostener sobre su cabeza la pesada barra de discos.

En este simplísimo caso, el sentido común debe moderar sus ambiciones. El físico tiene razón: el trabajo mecánico no es igual a cero, únicamente si la fuerza actúa en alguna trayectoria. Al no haber movimiento, el camino es igual a cero y es igual a cero también el trabajo mecánico. Desde luego, el atleta consume muchísima energía cuando mantiene sobre su cabeza la barra de discos. Pero la energía no se transmite a la barra. Toda ella se va al calentamiento de los músculos, cuyos filamentos van contrayéndose y relajándose consecutivamente. El mecanismo de excitación paramétrica de las oscilaciones de los péndulos y de las cuerdas lo había comprendido ya el famoso lord Rayleigh. Mandelshtam y Papaleksi aplicaron este principio a todos los sistemas oscilatorios y, después de comprender su universalidad, hallaron un

nuevo método de excitación para las oscilaciones eléctricas, una nueva forma de obtener energía eléctrica, un nuevo tipo de motor eléctrico.

El columpio eléctrico

El principal método de obtener energía eléctrica también en nuestros días está basado en el empleo de generadores rotatorios, o dinamos, como los denominaban antes. De este modo se obtiene energía eléctrica no sólo en las habituales centrales termoeléctricas o hidroeléctricas, donde los generadores se ponen en movimiento por medio de vapor o agua corriente, sino también en las centrales atómicas existentes. Los demás métodos, igual que el método paramétrico de generación, tienen, por el momento, importancia auxiliar. No obstante, para nosotros es muy importante el último método, ya que ésto condujo a los científicos a un nuevo tipo de láser.

El método es muy sencillo. Aquí se utilizan las propiedades de un circuito oscilante corriente, tomado como el equivalente eléctrico del columpio. El circuito más simple está formado por un condensador eléctrico — dos placas metálicas, separadas por un espacio de aire — y una bobina de alambre. Si en las placas del condensador aparecen cargas eléctricas — positiva en una y negativa en la otra —, por la bobina fluirá la corriente. Las cargas desaparecerán, mas la corriente continuará hasta que en las placas no aparezcan cargas exactamente iguales, pero con signo opuesto. Donde había el signo "más" aparecerá el signo "menos", y viceversa. Luego todo se repite en sentido opuesto y seguiría repitiéndose el tiempo que uno desease,

si no fuese que parte de la energía se consumiera en el calentamiento de los alambres. Poco a poco, toda la reserva de energía acabará por convertirse en calor y así cesarán las oscilaciones.

Pero recordémonos del columpio. Apartemos las placas del condensador cada vez que la carga en él alcance la magnitud máxima, y situémoslas en su lugar cuando la carga sea igual a cero. Sería necesario efectuar dos veces durante un período el trabajo contra las fuerzas de atracción de las cargas opuestas. Como resultado, la tensión en el condensador irá aumentando poco a poco, y la energía de las oscilaciones eléctricas comenzará a incrementar a costa del trabajo mecánico. En esto se basa el funcionamiento del generador paramétrico. En condiciones reales, la energía de las oscilaciones eléctricas no aumentará infinitamente, sino que sólo hasta el momento en que se establezca el balance entre el trabajo mecánico, consumido para desplazar las placas del condensador, y el calentamiento de los cables. Desde luego, puede hallarse también un modo de emplear con utilidad la energía eléctrica que surge en este caso.

El columpio láser

La teoría general de las oscilaciones permite, partiendo de todo lo que se ha estudiado en la rama de las oscilaciones mecánicas y eléctricas, prever fenómenos análogos en otras ramas, y en particular, en la óptica.

A la par con la multiplicación de frecuencia de la luz, la teoría predice que en ciertas condiciones puede surgir luz con frecuencia más baja que la que excita la luz de láser. Semejantes

condiciones surgen, en particular, en algunos cristales, en los cuales la radiación verde del láser a argón excita ondas amarillas, rojas o incluso infrarrojas. Es característico que cada una de las ondas se propaga sólo en sentidos completamente determinados. Estos sentidos se definen por las condiciones del sincronismo, de las que ya hemos hablado en relación con la multiplicación de frecuencia de la luz en semejantes cristales. A diferencia del caso de la excitación paramétrica de las oscilaciones de los péndulos y de los circuitos eléctricos, en el que la intensidad de las oscilaciones aumenta con el tiempo, aquí, en la óptica, las oscilaciones se amplifican a medida que la onda va penetrando en la profundidad del cristal. Además, la amplificación es tanto más fuerte cuanto mayor sea la distancia en la que se conservan las condiciones del sincronismo.

Hasta el momento no hemos visto vía alguna que condujera al cambio suave de la longitud de onda de la radiación de láser. Para alcanzar este objetivo perseguido, es preciso hallar en los cristales la posibilidad de hacer surgir condiciones más complejas de sincronismo, que enlacen entre sí no dos, sino tres ondas luminosas. También aquí Jojlov y Ajmánov partieron de la analogía radiotécnica. Anteriormente, al examinar el proceso de la generación paramétrica, habíamos hablado sólo de la generación de armónicos fraccionarios con frecuencias iguales a la mitad, a una tercera parte y a otras fracciones de frecuencia de las oscilaciones excitantes. Pero si en lugar de un simple circuito oscilante se utiliza el sistema de dos circuitos acoplados, las posibilidades se ampliarán repentinamente.

Si los circuitos están sintonizados de tal modo que la suma de sus frecuencias de resonancia sea igual a la frecuencia de la señal excitante exterior, la señal excitará oscilaciones paramétricas en ambos circuitos a la vez. La frecuencia de cada uno de los circuitos ya no tiene que ser estrictamente fijada y éstos pueden reajustarse. Es bastante con observar una condición: la suma de sus frecuencias de resonancia quede invariable e igual a la frecuencia de la señal exterior.

Jojlov y Ajmánov comprendían que en la óptica esto no es suficiente. Además de la condición de la suma de frecuencias de las oscilaciones a excitar, deberá cumplirse también otra condición muy importante. Resulta que los sentidos de propagación de las tres ondas también tienen relación entre sí y con las longitudes de ondas correspondientes, de modo que deben formar un triángulo, cuyos lados sean inversamente proporcionales a la longitud de onda correspondiente.

Podía parecer que la nueva condición hacía imposible garantizar el sincronismo ondulatorio y, al mismo tiempo, inaccesible la conversión eficaz de la energía de la onda excitatriz en energía de dos ondas a excitar. No obstante, Jojlov y Ajmánov notaron que en muchos cristales puede cumplirse esta condición. Es más, al girar el cristal con respecto al sentido de propagación de la onda láser, resultan realizables las condiciones de sincronismo para distintas frecuencias. Este es, precisamente, el método más simple para el reajuste de frecuencia del nuevo aparato denominado por los autores láser paramétrico.

La potencia de salida del láser paramétrico es proporcional a la potencia de la radiación

excitatriz y aumenta rápidamente con la longitud del cristal. Mas tanto una vía como la otra tienen limitaciones. La desmesurada potencia de la radiación *excitatriz*, aun en caso de que se logre obtener, destruirá el cristal. También es difícil aumentar demasiado la longitud del cristal, puesto que la complejidad y el costo de cultivo de grandes cristales homogéneos crecen mucho más rápidamente que el tamaño del cristal a obtener.

Jojlov y Ajmánov evitaron estas dificultades situando el cristal en un resonador óptico compuesto de dos espejos planos, igual que en los láseres corrientes. Las ondas que se excitan en el cristal a consecuencia de la interacción paramétrica, se reflejan de los espejos y pasan reiteradas veces a lo largo de él; además, cada vez aumenta sustancialmente su intensidad.

Hoy día los láseres paramétricos permiten abarcar suavemente el intervalo de frecuencias que incluye la luz visible y una parte considerable de la gama infrarroja. Estos láseres obtuvieron amplia aplicación en las investigaciones espectrales y en el estudio de los procesos biológicos y químicos. Los cristales no lineales pueden servir también de micrófonos ópticos peculiares. Con ayuda de éstos, pueden modularse las ondas luminosas, igual que con la ayuda de micrófonos se modulan las ondas hertzianas para transmitir música o conversaciones.

El fenómeno de refracción óptica controlada adquirió últimamente gran importancia práctica. La refracción atmosférica, que distorsiona el camino de los rayos en el aire, la descubrió, como es sabido, Ptolomeo. Esta hay que tenerla en cuenta también durante el funcionamiento de los radares. La refracción se manifiesta en

cualquier medio si su índice de refracción no es igual en todas partes. Los "nudos de vidrio", es decir, las ondulaciones en el cristal de las ventanas que desvían la luz al pasar ésta a través de ellos, se deben precisamente a la infracción de la homogeneidad óptica del vidrio.

En las sustancias, cuyos índices de refracción dependen mucho de la tensión eléctrica aplicada, puede producirse la aparición de la refracción artificial y, de este modo, variar la dirección del haz de luz que pasa a través de la sustancia. Tales dispositivos se utilizan, en particular, en algunos sistemas de televisión de pantalla amplia y en algunos tipos de localizadores ópticos.

Los fenómenos ópticos no lineales es la rama en la que se manifiesta claramente la indivisible unidad de la naturaleza dual de la luz. Todo lo que acabamos de decir sobre la multiplicación de la frecuencia de la luz se expresó por medio de las nociones ondulatorias, muy conocidas por los radistas. Aunque todo esto puede expresarse también de otro modo.

Ayer y mañana

Desde el punto de vista cuántico, la duplicación de frecuencia tiene el aspecto siguiente. El cristal que posee propiedades no lineales, transforma dos cuantos de pequeña energía (dos cuantos de radiación infrarroja) en un cuanto con el doble de energía (un cuanto de luz verde).

Correspondientemente, la excitación paramétrica de la luz representa la desintegración del fotón excitante en dos fotones secundarios, siendo su energía total igual a la energía del primero, y su impulso total, igual a su impulso inicial.

La óptica no lineal pronostica el gran papel que desempeñan otros procesos en los que participan a la vez varios fotones. El límite rojo del efecto fotoeléctrico, que le sirviera a Einstein como punto de partida para crear la teoría cuántica de la luz, pierde su importancia al haber altas intensidades de radiación aseguradas por los láseres. En el rayo láser, los fotones vuelan tan "nutridamente", que dos o hasta varios fotones pueden entregar simultáneamente su energía a un electrón y arrojarlo a éste a través de la barrera energética, cuya altura forma una barrera infranqueable para un fotón solitario de la frecuencia dada.

Esto se refiere también a la ionización. Por regla general, los fotones participan de uno en uno en los procesos de excitación e ionización de los átomos. N. Delone, en el laboratorio del Instituto de Física de la Academia de Ciencias de la URSS dirigido por M. Rabinóvich, estudió la ionización multifotónica de los gases inertes y observó los actos de ionización en los que participaban simultáneamente once fotones.

Es posible que sean más interesantes los procesos en los que participan no sólo varios fotones, sino también cuantos de sonido, o fonones.

Uno de estos procesos es la dispersión de la luz en ondas térmicas, o dispersión de Mandelshtam—Brillouin. Desde el punto de vista cuántico, aquí todo es muy simple, pues la onda sonora puede examinarse como un flujo de cuantos de sonido (fonones), absolutamente del mismo modo como la onda luminosa puede representarse por un flujo de cuantos de luz, o fotones. La opción de una u otra noción depende del carácter que tenga el fenómeno a examinar. En unos fenómenos aparecen más claramente las

propiedades ondulatorias; en otros, predominan las cuánticas.

En el enfoque cuántico, la dispersión de Mandelshtam—Brillouin se reduce a la colisión del fotón con el fonón. El fotón desaparece y al mismo tiempo nace otro nuevo con distinta frecuencia, que es menor, si en este caso se genera también un fonón, y mayor, si el fonón también desaparece. En semejante proceso no sólo se transforma la energía, sino también los impulsos de las partículas que actúan recíprocamente: el impulso del fotón secundario es igual a la suma de impulsos del fotón primario y el fonón que ha participado en el proceso.

En cambio, si la intensidad de la luz incidente es muy grande, lo cual es fácil de lograr mediante láseres de funcionamiento por impulso, el cuadro de dispersión de Mandelshtam—Brillouin varía de manera brusca. Cuando la intensidad de luz es pequeña, la dispersión es proporcional al número de fonones. Siendo la intensidad grande, el número de fonones aumenta bruscamente a costa del engendramiento de nuevos fonones en el proceso de dispersión. Como resultado, aumenta rápidamente también la propia dispersión. Así surge la avalancha fotónico-fonónica. Este proceso se denomina dispersión estimulada de Mandelshtam—Brillouin. La avalancha fonónica puede, como lo demostraron Prójorov y Bunkin, provocar la destrucción del material en el que transcurre este proceso. Así puede suceder también la autodestrucción del láser, ya que la dispersión estimulada de Mandelshtam—Brillouin se produce también en los elementos activos del láser.

La dispersión de combinación, descubierta en 1928 por Mandelshtam y Landsberg en Moscú,

y por Raman y Krishnan en Calcuta, es también un proceso de muchas partículas con la participación de dos fotones y fonones. Esta dispersión se distingue de la anterior en que los fotones que participan en ella no se relacionan con las oscilaciones térmicas del medio como un todo, no con las ondas térmicas, sino con las vibraciones intramoleculares.

En las intensidades de luz a escala de láser puede observarse la dispersión de combinación estimulada, durante la cual de la misma manera vertiginosa aumenta la intensidad de la luz difusa. Sobre esta base se logró crear un tipo de láser especial nuevo que permite obtener un brillo extraordinario de luz coherente.

La óptica no lineal constituye una de las direcciones más jóvenes de la antigua ciencia; y aunque actualmente haya conseguido muchos éxitos, son de esperar muchísimos más en el futuro.

CAPITULO V

IMAGENES

En el Neva

¿Tuvo usted la ocasión de contemplar el río Neva en una mañana serena de primavera desde el zaguán del Almirantazgo? La pesada mole de la Fortaleza de Pedro y Pablo observa sombríamente las extravagantes líneas del Palacio de Invierno. El severo estilo del antiguo edificio de la Bolsa contrasta con las dos columnas rostradas, que hacen recordar aquellos tiempos lejanos, cuando la vela, y no el vapor y menos aún el núcleo atómico, servían a los conquistadores de los mares y océanos. Es difícil pasar de largo sin detener la mirada en la silueta del pasado. Pero así es el hombre: recordándose del pasado, él aspira a lo nuevo.

A finales de los años 50, en una mañana de sol iba por el puente un hombre joven. Iba sin mirar para los lados, sin notar lo que le rodeaba. Se apresuraba al trabajo, y su trabajo iba con él. Por la tarde, el trabajo le acompañaba hasta casa, le sentaba al escritorio y no le permitía ir al teatro ni al cine. Tampoco le dejaba dormir hasta muy entrada la noche. Y por la mañana, cuando se despertaba, fresco y enérgico, el trabajo ya estaba aquí, apresurándole y acelerándole con nuevas esperanzas.

Y caminaba rápidamente por el malecón sin mirar a los lados, sin notar el edificio plano del Museo de Curiosidades de Pedro I ni el alto zaguán de la Universidad. Indiferente, doblaba del malecón hacia la derecha, entre los jardines, y, sin darse cuenta del verdor vivo ni del só-

lido edificio de la biblioteca, que aparecía a lo lejos, premeditaba una vez más lo que tenía que hacer hoy.

Entraba en el instituto, una de las primeras instituciones científicas creada por el Gobierno soviético, y después de atravesar largos pasillos abría la puerta del laboratorio y encendía la luz. Por lo general, las ventanas del laboratorio estaban cerradas con cortinas negras. El joven trabajaba en uno de los viejos problemas de la óptica. La luz aquí era también un trabajador. Un trabajador insustituíble, pero antojoso, y había que conducirlo, dirigirlo, igual que un jinete experimentado conduce su fogoso caballo.

En el instituto están vivas y se desarrollan las tradiciones de los eminentes ópticos S. I. Vavílov, D. A. Rozhdestvenski y otros sabios que consagraron su vida al estudio de las propiedades de la luz y al empleo de los fenómenos ópticos en beneficio del hombre. Aquí respetan y aprecian a los que entregan a la ciencia todo su tiempo, sus fuerzas, ideas y ensueños. Aquí, en la isla Vasílievski, se fusionaron y entrelazaron no sólo territorialmente, sino también en sentido ideológico, tres ramas de la ciencia: la académica, la universitaria y la industrial. Se fusionaron vislumbrando perspectivas muy lejanas, misiones concretas y, lo que es lo más importante, teniendo gente que sabía pensar y prever amplia y audazmente el futuro e ir con perseverancia hacia el objetivo planteado.

A la mayoría de sus colegas le parecía que el problema, con el que se batía Yuri Denisiuk, no era interesante. La humanidad había entrado en la era cósmica. Las centrales atómicas eran ya una realidad ¡y a él, figúrese, no le satisfacen las posibilidades de la fotografía!

Se han obtenido ya las imágenes de enormes galaxias y de pequeñísimos virus. Incluso se fijaron en placas fotográficas moléculas aisladas. Y los millones de las más diversas cámaras fotográficas en manos de aficionados y profesionales han convertido la fotografía en un verdadero arte que representa el mundo circundante en toda su diversidad. ¿Qué más hacía falta?

Sí, desde luego — se conformaban los amigos —, la fotografía no carece de deficiencias. Es plana, está muerta. Mas el verdadero maestro es capaz, a pesar de todo, de lograr maravillosos resultados con una cámara fotográfica corriente. Además, existe también el cine.

Hay numerosos problemas que son más urgentes y más interesantes. Tampoco puede olvidarse que en el perfeccionamiento de la fotografía trabajaron muchísimos hombres, incluyendo a grandes sabios e ingenieros de talento. Aquí cada paso nuevo requiere enormes esfuerzos. ¿Es que esto se recompense?

Pero Denisiuk comprendía perfectamente que los extraordinarios logros de la fotografía ocultan sus imperfecciones de principio. La fotografía puede fijar en la emulsión fotográfica sólo una parte despreciable de los datos sobre el objeto fotografiado que conceden las ondas luminosas. Este defecto tampoco se ha podido eliminar en el cine. Queda sin utilizar un torrente enorme de información y no es una futilidad el hallar la posibilidad de aprovechar toda esa información que se pierde. ¡Quien haga esto dará un paso importante, cuyas consecuencias son difíciles de prever!

La luz solar, el arco voltaico o cualquier otra fuente de luz se parece, en cierto sentido, a un pliego de papel blanco. Efectivamente, examinando el papel a través de una lupa o un microscopio nos podemos enterar de muchas cosas interesantes sobre su estructura. Pero esto sólo a los especialistas les hace falta. La mayor parte de la gente utiliza el papel para escribir o dibujar. El papel, convirtiéndose en la base de la impresión, condujo a la revolución intelectual. Desde hace muchos siglos el papel sirve de principal portador de la información que se transmite por medio de periódicos y revistas, y se retiene para muchos años y siglos en las hojas de los libros y de los actos legislativos. Desde luego, el papel también tiene aplicación puramente técnica. Mas aquí es similar también a la luz.

Al estudiar las particularidades de los rayos luminosos, llegamos a saber muchas cosas. El astrónomo se entera de la estructura de las lejanas estrellas; el fundidor de acero, de la marcha de la fusión; los mismos se utilizan también con fines tecnológicos. Para la humanidad, la luz es un espejo en el que está reflejado el mundo que nos rodea y el que recoge toda la información referente al mundo.

Tanto para el hombre como para el animal la función principal que desempeña la luz es transmitir información. En el proceso de evolución, la naturaleza creó el órgano sensorial más complejo y perfecto, el ojo. ¡Cómo seríamos nosotros sin vista!

La luz, reflejada por los distintos objetos del mundo exterior, lleva consigo riquísima información. El ojo percibe esta luz y transmite

al cerebro la información obtenida. Precisamente aquí es donde surge la noción sobre el mundo exterior, noción que es primitiva en los animales y más completa en el hombre. El ojo y el cerebro constituyen el canal principal mediante el cual estamos relacionados con el mundo exterior y podemos reflejarlo en nuestra conciencia.

Víktor Obujov era miope. Tan pronto que se quitaba las gafas, lo veía todo emborronado. El ya terminaba la universidad y los lentes tuvo que ponérselos por primera vez cuando empezaba la escuela, pero seguía percibiendo este par de cristales tan baratos como un milagro. A través de ellos se abre todo el encanto del mundo.

Cuando estudiaba física en la escuela, él sabía explicar ya que los cristalinos de sus ojos tenían una forma demasiado abultada y no podían crear en la retina una imagen bien clara. Mientras tanto, los lentes cóncavos de las gafas le ayudaban a hacer esto. Sabía también que los présbitas, quienes tenían los cristalinos muy planos, debían usar lentes convexos; de este modo, los músculos debilitados del ojo podían cumplir con su misión.

Para el escolar Víktor todo era muy simple y comprensible. Mas el estudiante Obujov sentía que tenía razón el postgraduado Denisiuk quien afirmaba que lo complejo parecía simple sólo cuando se observaba superficialmente.

Sí, sí, consentía muy apresurado Víktor, desde luego, el hombre se privaría de la felicidad, y la humanidad, del progreso, si la simplicidad y la claridad de la niñez no se destruían bajo la presión de la vida.

Denisiuk no se pondría a perder el tiempo en explicar lo que parecía evidente, pero le era ne-

cesario el interlocutor, o mejor dicho, el oyente para perfilar los argumentos, y Denisiuk procuraba formular sus ideas en una forma lógica y clara.

Así pues, la luz que difunde cualquier cuerpo lleva una información completa acerca del mismo. Además, ni el ojo de Víktor ni la cámara fotográfica son capaces de fijar tan siquiera una pequeña parte de esta información. ¿No es así?

¡Pues claro! ¿Cómo Víktor podría replicar? Le basta con quitarse las gafas para quedarse incapaz de obrar. El ve la luz, pero no percibe nada definido. Si en la retina no hay imagen, el cerebro es impotente. Es incapaz de extraer algo de la información que sigue penetrando, igual que antes, en la pupila del ojo, pero, como no está regulada por el cristalino, forma en la retina algo semejante a una masa luminosa. Víktor se encuentra en una situación difícil. Sus ojos son deficientes. Para los que tienen la vista normal les es más fácil. Sin la menor tensión, pueden pasar la vista de los objetos cercanos a los alejados y verlo todo con precisión y claridad. Cuando nuestra atención pasa de un objeto a otro, la curvatura del cristalino varía reflectoriamente. Un ojo con trastornos funcionales no puede hacer esto. Tampoco puede hacerlo la cámara fotográfica.

En la cámara fotográfica, donde la curvatura de los lentes del objetivo es invariable, la nitidez de la imagen se alcanza mediante la variación de la distancia que hay del objetivo a la emulsión. Si se descompone el enfoque, en la placa no se produce imagen alguna. Saldrá una masa emborronada como la que le sale al miope sin gafas. Precisamente esta enojosa propiedad del ojo y de la cámara fotográfica es la que se-

ñalaba Denisiuk. La imagen formada por el lente contiene muy poco de la imagen de los objetos reales. De todo el vasto espacio, se refleja con precisión solamente un plano. Todo lo que está fuera de él, más cerca o más lejos, no tiene nitidez. Y cuanto mayor sea la distancia que hay hasta el plano escogido, tanto peor será la nitidez de la imagen. ¿No es así?

La perspectiva

Víktor admitía respetuosamente la irreprochable lógica de los razonamientos de Denisiuk. Se pasaba horas enteras examinando la fotografía de un abejorro, obtenida con ayuda del teleobjetivo. Aquí se veían bien claros los finísimos pelitos en sus patitas y el pétalo de la flor, en la que estaba sentado; sin embargo, lo demás se desvanecía en un fondo gris indeterminado.

¿Qué había allí, cuando se tomó la fotografía? Esto nunca lo sabrá nadie, aunque los rayos de luz, sin duda alguna, transmitieron todos los datos a través del objetivo de la cámara fotográfica. Pero el objetivo, como si hubiese consumido totalmente sus capacidades en representar excelentemente una parte del cuadro, destruyó para siempre lo demás.

Así pues, ¿es posible fijar toda la información que transporta la luz y cómo hacerlo? En esto pensaba precisamente Yuri Denisiuk.

Lo principal que perdemos al utilizar la lente para obtener la imagen, es el carácter volumétrico. No en vano existe la expresión "es plano, como una fotografía". ¿Cómo no recordar aquí la pintura tradicional japonesa? En sus tradiciones se destaca, sobre todo, la perseverancia con que los pintores tendían a superar el es-

pacio. En estos cuadros, los objetos alejados están situados sobre los objetos cercanos sin que los últimos tapen a los primeros. Los tonos transparentes de la pintura al pastel y los borrosos contornos armonizan tan bien con los suaves paisajes montañosos, que el ojo no presta atención a la principal particularidad de esta pintura. Pero tan pronto como en el cuadro surge el producto de la mano humana con sus contornos precisos o si además de los paisajes alejados, aparece el primer plano, se recuerdan los dibujos infantiles. ¡Estos son planos! Sólo la viva imaginación del niño o la costumbre, educada a través de muchas generaciones, permite, abstrayéndose de la forma primitiva, repensar el carácter espacial y material del mundo real. Los niños recorren muy rápidamente el camino para el cual la humanidad invirtió muchos siglos. Ellos aprenden enseguida a dibujar en el papel las imágenes del mundo real. Los rieles, al perderse a lo lejos, se aproximan; los postes telegráficos van haciéndose más pequeños. Solamente más tarde los niños se enteran de que esto se llama perspectiva.

El dibujo y la pintura, carentes de perspectiva, no tienen perspectiva. Este retruécano áspero atañe en igual grado a la pintura abstracta y a ciertas corrientes artísticas de tendencia renovadora. Las ráfagas de viento siempre provocan cabrillas en la superficie del agua. Se crea una ilusión cabal de lo que es la corriente, aunque le falta profundidad.

El progreso es como un río caudaloso: corre por su camino, a pesar de los caprichosos soplidos e incluso tempestades capaces de retener por un tiempo su marcha secular.

La perspectiva es orgánicamente propia de

la fotografía. Las leyes de la óptica, que gobiernan el paso de la luz a través del objetivo, transmiten a la emulsión fotográfica la imagen del mundo exterior en completa conformidad con las exigencias de la perspectiva. Un objeto alejado resulta más pequeño que otro idéntico, pero que está más cerca. Es más, los objetos cercanos en la fotografía tapan todo lo que se encuentra detrás de ellos, lo cual permite, en cierto grado, juzgar acerca de las distancias. Mas esto no es el verdadero carácter estereoscópico. Así lo vemos cuando cerramos un ojo.

Víktor pasaba la mirada de la fotografía del abejorro a la reproducción del antiguo paisaje japonés y con aire pensativo sacudía sus gafas.

La vista estereoscópica, pensaba Víktor, es el resultado de la conjunción de la física con la fisiología. La propia física es aquí impotente. ¿Tal vez pida demasiado el postgraduado?

Cualquier persona sabe por qué tenemos dos ojos. Cada uno de ellos ve desde su punto de vista. Un poco de la derecha y otro poco de la izquierda. Y no nos damos cuenta en qué se distinguen los cuadros que ve cada uno de los ojos. Ambos cuadros van al cerebro y éste, sin la participación de la conciencia, analiza las diferencias insignificantes que hay entre los dos y, de este modo, crea la idea de lo volumétrico.

Víktor no pudo descubrir en los manuales ni en las enciclopedias quién y cuándo tomó la conciencia de todas las ventajas que tienen los animales superiores al poseer dos ojos. Tampoco encontró cuándo fueron construidos los primeros gemelos que unieron dos anteojos de Galileo.

Preparando el informe para el seminario sobre la visión estereoscópica, Víktor estudió los trabajos de Helmholtz, quien a mediados del

siglo pasado no sólo había puesto los cimientos do la nueva fisiología de la vista, sino que creó también el telestereoscopio, aparato que parecía abrir más aún los ojos del hombre. Con ayuda de dos pares de espejos paralelos, de los cuales los extremos estaban separados a más de un metro, el observador veía los objetos distanciados tan volumétricos, como se von a simple vista los objetos cercanos. Este principio es ahora la base de la mayoría de los telómotros ópticos. El primer microscopio para observar con los dos ojos resultó ser 200 años más viejo, aunque, seguramente, fuera mucho más difícil construirlo.

— Es maravilloso — decía Víktor en el seminario — que el primer estereoscopio, aparato para examinar imágenes volumétricas fuera más antiguo que la fotografía. Un tal R. Smith publicó en 1738 un dibujo apareado, preparado especialmente por él, y describió un dispositivo muy simple capaz de croar en la persona, que miraba el dibujo a través de dicho dispositivo, una ilusión plena de lo volumétrico. ¡A quién de nosotros no le entretenían semejantes juguetes en los años infantiles!

Víktor preparaba el informe escrupulosamente; se destacó incluso mencionando de paso lo fácil que era construir un par estereoscópico con ayuda de una cámara fotográfica corriente: es suficiente sacar dos fotografías, sin olvidarse de desplazar un poco la cámara antes de sacar la segunda foto. Claro que el objeto a fotografiar debe quedar inmóvil. El cerebro hace su labor infaliblemente. La simultaneidad no es obligatoria aun cuando se está mirando. Aquí es bastante con tapar rápidamente uno u otro ojo. Lo importante es que en cada ojo ingrese la información correspondiente. No obstante, no hay

que confundir el lugar donde se encuentra la imagen de la derecha y la de la izquierda.

Pero aquí hizo uso de la palabra Yuri Denisiuk, y el entusiasmo de Víktor se apagó.

— La cuestión consiste — dijo Denisiuk — en que después de la primera pasión por la magia del estereoscopio, decayó su popularidad, aunque hay en la venta cámaras fotográficas estereoscópicas y estereoscopios cómodos. Causan demasiado ajetreo. Y, sin duda alguna, gran parte del placer se pierde cuando hay que verlo aisladamente. El hombre es un ser social. Esto se manifiesta incluso cuando se examina una fotografía lo que es una poqueñez de por sí.

— ¿Y el cine? — comenzaron a susurrar en la sala —. Usted se ha olvidado del cine.

— El cine, claro está, indicó la salida del atolladero. Pero sólo en parte. El cine pretendía dominar la estereoscopia; en cambio, rechazaba todo lo que estaba relacionado con las complicaciones para los espectadores, incluyendo las gafas especiales.

— Perdone, pero usted se ha olvidado de los sistemas de trama — esto era el punto más importante de la intervención de Víktor. — Miles de alambritos finos y estirados de un modo especial, ocultaban del ojo derecho todo aquello que estaba destinado para el ojo izquierdo, y a la inversa. Solamente había que mover un poquito la cabeza para situar los ojos en la posición adecuada.

Cualquiera que haya visitado el cine estereoscópico aunque sólo fuese una vez, habrá experimentado, sin duda alguna, gran placer al ver el movimiento de las imágenes volumétricas.

— Hace poco, el principio de trama — concluyó Víktor — fue utilizado nuevamente para

obtener imágenes volumétricas inmóviles. Me refiero a las tarjetas postales volumétricas que aparecen ya en muchos países, aunque únicamente sea posible lograr en ellas el efecto estereoscópico cuando se logra una gran precisión, lo cual es accesible exclusivamente en condiciones industriales, aunque tampoco en este caso es fácil de hacerlo. La imagen doble debe aplicarse a un plástico transparente especial, en cuya superficie están prensadas previamente miles de pequeñísimas rayitas paralelas, casi imperceptibles a simple vista — aseguraba el informante —, aunque pueden palparse al pasar la uña por la superficie. Sirven para orientar hacia el ojo la parte de la imagen destinada precisamente para éste. A usted le da la impresión de que dentro de la gruesa capa transparente cuelgan objetos volumétricos y, después de coger la tarjeta en las manos, uno se queda asombrado de lo finísima que es. ¡Y cuán fuerte es la ilusión visual, basada en que al cerebro, en fin de cuentas, le es indiferente cómo es la fuente que le envía las señales! En estos casos, el cerebro parece como si se armara con los versos de Pushkin: "Ah, engañarme no os difícil, pues me da gusto engañándome a mí mismo".

Lo cierto es que si bien Víktor no esperaba ovaciones, tampoco esperaba objeciones. Sus ayudantes eran los voluminosos infolios y las expresiones de los clásicos. Pero Denisiuk puso de nuevo el punto sobre la "i".

— De todos modos, la estereoscopia carece de porvenir en cuanto a la obtención de imágenes volumétricas, ni puede tenerlo. Mucho antes de que se obtuvieran los últimos logros en la estereoscopia, se sabía ya claramente lo que ella era incapaz de dar en cualesquiera condiciones.

Examinando un par estereoscópico a través del esteroscopio o de la pantalla de trama moderna, usted sólo podrá ver la imagen tal y como la ha fijado la cámara fotográfica. Sólo desde el punto de vista donde estaba esa cámara. Usted no podrá ver el objeto un poco de lado, aunque en este caso pudiesen descubrirse los detalles más interesantes. Y es comprensible por qué: en la placa se fija única y exclusivamente lo que "vio" el objetivo de la cámara fotográfica. Lo demás, que pasó de lado, se perdió irremediablemente. Mas se perdió también una parte de la información que había caído en el objetivo. Se pudo fijar, pero se perdió inútilmente. Perdónenme, pero vuelvo a repetir que no sabemos fijar aún toda la información que la luz transmite.

El barro y los dioses

Víktor procuraba no perder ninguna ocasión de observar el trabajo de Denisiuk. La precisión y la finura de los experimentos del postgraduado causaban placer puramente estético. Se enfrascaba tanto en su trabajo que no le distraía la presencia de personas ajenas, siempre que no le molestasen. Pero Víktor no se consideraba ajeno, él era un estudiante agregado, aunque habían colaboradores científicos que con todo su aspecto querían darle a comprender que no estuviese molestando aquí; otros consideraban que los estudiantes eran mano de obra gratuita, capaz solamente de llevar acumuladores, perforar orificios o conectar cables.

Denisiuk comprendía y apreciaba a los ávidos de saber. Estaba convencido por su propia experiencia de que el desarrollo del científico

depende en mucho de las condiciones en las que él cae y de la gente que lo rodea. A Víktor, estudiante de la Universidad, le parecía que Denisiuk le envidiaba un poco; Víktor sabía que Denisiuk deseaba también ingresar en la Universidad, mas la vida dispuso de otra manera.

Denisiuk nació en Sochi, su padre era chófer; su madre, camarera. Desde muy pequeño se quedó sin padre. Poco más tarde tuvo que abandonar el sur soleado, pues su madre se trasladó a Leningrado. Aquí Yuri ingresó en la escuela y aquí le sorprendió la guerra. Un año entero vivieron en la ciudad sitiada. Experimentaron todas las penalidades que tuvieron que sufrir los valientes leningradenses. En 1942, les evacuaron. El robusto organismo de Yuri, que entonces tenía quince años, salvó enseguida las consecuencias del bloqueo. Ingresó en una escuela de peritaje. Para aquel tiempo había florecido en él el amor a la física, propensión que le había surgido siendo escolar. En el tiempo libre, Yuri leía libros de física para los centros de enseñanza superior, estudiaba a fondo las matemáticas.

Igual que todos los chicos de los años de guerra, él apresuraba al tiempo para hacerse mayor e ingresar en las tropas aéreas o blindadas. Los conocimientos de la física, de las matemáticas y de los motores podían abrirle antes las puertas del comisariado militar. Mas el pueblo soviético logró la victoria sin la participación de Yuri. En la vida pacífica surgieron muchísimos problemas urgentes.

Poco a poco la física iba entrando en su vida. Primero era una pasión juvenil que se conservó hasta después de su retorno a Leningrado, donde terminó la escuela de peritaje de construcción naval. Luego esa pasión pasó a ser un verda-

dero anhelo, pero las circunstancias le obligaron a renunciar de la Universidad e ir a trabajar.

Los libros de Paul de Kruif, ajenos completamente a la física, le excitaban de una manera maravillosa la pasión por la ciencia.

La madre jugó un papel decisivo en la vida de Denisiuk. De ella heredó la facultad y la ambición por los conocimientos. Ella llegó a ser una buena ingeniera, y él no podía quedarse atrás. Denisiuk ingresó en la sección nocturna del Instituto de Mecánica de Precisión y Optica de Leningrado, pues no tenía otra cosa que escoger. Aquí había facultad de física, mientras que la facultad de física de la Universidad no tenía sección nocturna.

Víktor sabía que Denisiuk, aun después de terminar el instituto, no pudo dedicarse a la física. Le destinaron al Instituto Estatal de Optica y comenzó a trabajar en un laboratorio donde elaboraban nuevos aparatos ópticos, y con la física aquí se ocupaban otros. Denisiuk tenía que solucionar problemas ingenieriles y los solucionaba. El deber estaba ante todo. Pero también tenía sus horas libres que él dedicaba a la física, a la que pensaba entregarse por completo.

Algunas veces, cuando Denisiuk revelaba sus placas y la oscuridad absoluta obligaba a Víktor a estar sentado sin hacer nada, Denisiuk compartía con él sus ideas:

— Crear nuevos aparatos ópticos — decía — es una cosa complicada e interesante. Complicada porque ya han alcanzado una alta perfección y es difícil dar el paso siguiente. Es interesante porque sólo la superación de las dificultades puede entusiasmar verdaderamente. Lo que se da con facilidad pronto aburre. Yo, como in-

goniero, tuvo que cumplir muchas tareas simples. Eran necesarias para el laboratorio, pero siempre deseaba algo más complicado.

Y en este tiempo — continuaba Denisiuk —, me cayó en las manos una novela de ciencia ficción. El protagonista aprendió a crear copias de objetos reales; no imágenes, sino copias. Copias precisas que no podían diferenciarse del original. Parecía como si me hubiesen dado un martillazo en la cabeza. Es posible que yo, subconscientemente, pretendiese hacer algo semejante. El grano había caído en un suelo fértil. A mí me parecía que yo podía y que debía lograrlo. Desde luego, semejante cosa no podía incluirla en el plan y por eso decidí continuar los estudios de posgraduación. Tuve suerte. Hablé con Evgueni Yudin, magnífica persona y experimentado fotometrista. El me comprendió y consintió ser mi dirigente científico, aunque después reconoció que no creía entonces en mis delirios. Simplemente veía mis grandes deseos y comprendió que era imposible hacerme cambiar de opinión. Un científico con espíritu creador, opinaba Evgueni Yudin, siempre es útil. "Dejad que Denisiuk se tranquilice — pensaba él —, dejadle que persiga a las quimeras; después se pondrá en razón". Pero después, cuando la cosa comenzó a avanzar, él no me impedía seguir mi camino. Se interesaba y yo, al explicarle las dificultades y obstáculos, hallaba la manera más fácil de superarlos.

Un oyente atento y meditador — terminó Denisiuk — es una gran cosa. Este, igual que un catalizador, estimula las reacciones mentales.

— ¿Quiere decir que usted pasó de la ficción a la ciencia? — preguntó Víktor.

— Considéralo que así es. Pero más bien vine de la filosofía. Ya en el instituto sentí gran interés por la teoría de la reflexión de Lenin. ¿Sabes cómo decía? El desarrollo desde la más simple forma de reflexión, propia de la materia exánime, hasta el razonamiento, la forma superior de reflexión. Yo quería encontrar el modo de reflejar los objetos reales de manera tan completa que en la imagen estuviesen comprendidas las más pequeñas particularidades del original. La fotografía no es capaz de hacerlo, muestra solamente sombras planas y muertas.

El jeroglífico o el texto escrito dan más, en cierto sentido. Cuando la persona lee "perro" o "águila" se representa la imagen completa hasta el último pelito o hasta la última plumita.

Con ayuda de la óptica, yo quería inventar un código, una escritura cifrada que se sometiese al desciframiento sin necesidad de recurrir a la ayuda de la imaginación. Y lo hallé en el propio fundamento de la óptica: en las propiedades de las ondas luminosas, en las leyes de los campos ondulatorios.

A veces, a Víktor le parecía que Denisiuk, en su arrobato, se olvidaba de su presencia. El no oía una narración o una explicación, sino un flujo de ideas. Víktor comenzaba a ser partícipe del proceso creador. Parecía como si Denisiuk reapreciase una y otra vez su trabajo, sus bases y sus detalles. Y Víktor solamente "reflejaba" las ideas del científico, facilitándole las condiciones para dar el paso de un razonamiento a otro.

Cada objeto refleja la luz a su manera, llevando ésta información acerca del objeto, una información muy detallada sobre su forma y

color, su capacidad de absorber y reflejar las distintas ondas luminosas. El objetivo fotográfico y la emulsión escriben sólo una pequeña parte de este flujo de información.

Una información muchísimo mayor puede extraerse mediante la comparación de la estructura de la onda reflejada por el objeto, con la onda incidente, con la onda progresiva que viene de la fuente de luz y que aún no ha sufrido distorsión por objeto alguno... Que no está distorsionada por ningún objeto... objeto...

¡Aquí está el salto, sin el cual es imposible penetrar en lo ignoto!

En esta idea se entrelazaron subconscientemente la teoría de la reflexión y la teoría ondulatoria de la luz. Y el fenómeno de la interferencia — interacción de dos campos ondulatorios —, descubierto a principios del siglo pasado por Thomas Young, señalaba claramente cómo comparar el campo de la luz incidente y de la reflejada. Es menester sobreponer el uno sobre el otro, obligarlos a interferir y fijar los resultados en la emulsión fotográfica. Después... Está claro lo que hay que hacer después. Unicamente hay que hacer memoria de la placa de zonas de Fresnel. Una placa a la superficie de la cual se le aplica el sistema de anillos concentrados, cuyas dimensiones fueron calculadas por Fresnel. Es una placa plana, capaz de enfocar la luz, igual que una lente convexa. ¡La placa funciona igual que una lente!

No, no en vano se dedicó Denisiuk a la óptica. ¡Ahora ella, la óptica, tiene que pagarle con creces y aliviarle la labor ulterior!

Denisiuk conoce bien esta rama de la técnica óptica. La placa de zonas de Fresnel representa una imagen artificial de una lente, una lente ci-

frada. ¡Para descifrar la escritura es suficiente dirigir hacia ella un haz de luz!

Para fijar en la emulsión fotográfica la información que lleva la luz difusa no sirve, ni mucho menos, cualquier luz. Es más, ninguna de las fuentes conocidas por el hombre daba la luz con la calidad requerida. La luz que emiten estas fuentes es semejante al ruido. La energía en ella puede incluso ser muy grande, pero carece de un orden que es propio a las ondas sonoras engendradas por el violín o a las olas que corren por el mar cuando hace buen tiempo.

Denisiuk había obtenido ondas luminosas ordenadas, recortando con este fin estrechas líneas espectrales de la radiación de potentes lámparas de vapor de mercurio.

Y a Víktor le parecía que Denisiuk se movía por un círculo cerrado. Al pretender poner en orden las ondas luminosas utilizadas, debía recortar una zona espectral cada vez más estrecha y así se reduce inevitablemente la energía luminosa que ingresa a su disposición. Como consecuencia se alarga más el tiempo necesario para la escritura cifrada, o sea, el cuadro interferencial. A pesar de todos los esfuerzos, con esta luz era posible obtener cuadros interferenciales sólo en locales que se encontraban en completa oscuridad y únicamente de objetos pequeños situados muy cerca de los aparatos que ocupaban la mesa de Denisiuk.

Cuando Víktor entró por primera vez en el laboratorio de Denisiuk, éste dedicaba la mayor parte de su tiempo a los experimentos ajenos a la óptica. Ante él aparecía un Denisiuk nuevo: no como físico, sino como químico y tecnólogo, como especialista en elaboración y preparación de emulsiones fotográficas. Las emulsiones foto-

gráficas corrientes pueden reproducir decenas de líneas distintas en cada milímetro, pero a Denisiuk el Optico le hacían falta emulsiones con poder resolutivo de centenas y mejor aún de miles de líneas por cada milímetro. Mas esto tampoco era todo. Las emulsiones corrientes sólo daban la imagen en capas finas y lo que se había propuesto Denisiuk requería emulsiones gruesas que dejaran pasar la luz a bastante profundidad. Y Denisiuk el Optico rechazaba implacablemente los resultados de Denisiuk el Químico hasta que por fin, gracias a los enormes esfuerzos, consiguió unas emulsiones convenientes.

Víktor le preguntó cierta vez:

— ¿Por qué usted no encarga las emulsiones a los especialistas?

— Por ahora — contestó —, tales emulsiones solamente las necesito yo. Los especialistas, sin estas emulsiones, ya están bastante recargados con trabajos urgentes. Pero no importa, no cuecen los dioses el barro.

Color sin colores

Cierta vez, al hablar acerca de su método, Denisiuk mencionó las fotografías en colores de Lippmann. El no pensaba que podría conmover algo en el alma de su ayudante voluntario y que éste comenzase a detenerse por la tarde en el laboratorio. A Víktor, no se sabe por qué, le cautivó el método de obtener fotografías en colores mediante emulsiones en blanco y negro. Aquí no había nada nuevo ni nada extraordinario. Tampoco vaticinaba perspectivas singulares. Hoy día este método de fotografía en colores ya hace tiempo que ha cedido a otros métodos nuevos que requieren emulsiones multicolor contempo-

ráneas. Pero algo había en el método de Lippmann que entusiasmó a Víktor.

Este hasta hizo una fotografía de ésas. Lo más difícil fue hacer un chasis especial para verter en él mercurio. La placa se situaba dentro del chasis con la emulsión para adentro, apretándose bien por los bordes. Después se echaba el mercurio en el chasis.

El mercurio servía aquí de espejo que hacía volver la luz que había pasado a través de la emulsión nuevamente a ésta. Sin el mercurio era imposible trabajar y Víktor tuvo que realizar toda esta labor bajo la campana de humo del laboratorio químico.

Después de haberlo hecho todo, Víktor reveló la placa. Desde entonces la tuvo sobre la mesa. Al caer sobre ella la viva luz solar o la luz de una lámpara corriente, se ve una rosa de color rojo vivo en un fondo de hojas de color esmeralda.

Algunos de los conocidos de Víktor no podían creer que esta preciosa fotografía no estuviese hecha con emulsión en colores. A sus compañeros estudiantes se lo demostraba con ayuda del microscopio, a través del cual en la emulsión sólo se veían las habituales manchitas negras. Pero los que no eran ópticos no le creían.

Para comprender verdaderamente la causa del milagro, es necesario observar el corte de la emulsión desde un costado, que tampoco es una cosa fácil. El aumento debe ser grande, puesto que había que examinar la estructura, cuyas dimensiones se medían en micrones.

Los escépticos, igual que antes, seguían sin ver color alguno. Sin embargo, era imposible dejar de notar que en la posición de los puntos negros había una regularidad inesperada. Resul-

taba que se agrupaban en capas, situadas a la misma distancia una de la otra. Verdad es que estas distancias eran distintas en diferentes lugares de la emulsión; también era distinta la densidad de las capas, pero se lanzaba a la vista un paralelismo casi completo en todas las partes de la emulsión. A uno que no es óptico, esto, desde luego, no le decía nada. Pero a quien ya conocía las leyes de la luz se le presentaba otra magnífica particularidad de la óptica: la placa fotográfica, sometida a exposición por el método de Lippmann, se distinguía en que su emulsión en blanco y negro no sólo fijaba el contorno de la imagen del ramo de rosas, formado por el objetivo, sino que dejaba impresa también la información acerca del color de las distintas partes de la imagen; además, de tal manera que la información se transformaba directamente en sus respectivos colores al iluminar simplemente la placa con luz blanca.

La diversidad del brillo del objeto, igual que en la fotografía corriente, se reflejaba en la placa con el grado de ennegrecimiento de la zona correspondiente de la placa. La información acerca del color quedaba impresa por la alternación de las capas negras y blancas, que se cambiaban por turno en el grosor de la emulsión. Las capas fijaban las ondas luminosas estacionarias formadas por la interacción de ondas que llegaron del objeto y las ondas reflejadas que fueron lanzadas a su encuentro por la capa especular de mercurio situada detrás de la emulsión. Es un código astuto, en el que está impresa la información acerca del color del objeto y Lippmann supo comprenderlo y utilizarlo.

Algo semejante a eso lo puede ver cualquiera en la superficie del agua, cuando un tren de on-

das bastante largo se refleja de algún obstáculo prolongado e inmóvil. Parece como si en la superficie quedase quieta la onda estacionaria, aunque ésta no sea una onda simple. La onda reflejada es la continuación de la onda incidente. Son dos partes de una misma onda, por eso mantienen rigurosa concordancia entre sí. Son mutuamente coherentes, diría el físico, en tanto en cuanto son coherentes las distintas partes de la propia onda incidente. Las partículas de agua junto al obstáculo son prácticamente inmóviles. A cierta distancia del obstáculo, la amplitud de oscilaciones es máxima. Esto es el vientre de la onda estacionaria. A medida que se van alejando del obstáculo, los vientres siguen uno tras otro a una misma distancia, separados por nudos, es decir, zonas donde el agua está prácticamente inmóvil.

Las distancias entre los vientres son iguales a las distancias entre los nudos. Son dos veces más pequeñas que la longitud de onda que corre por la superficie libre de agua lejos del obstáculo a donde no llegan las ondas reflejadas.

En su deseo de reflejar los colores del mundo circundante, Lippmann halló el modo de fijar en la emulsión fotográfica las ondas estacionarias de la luz. La capa superficial de la emulsión contigua al espejo sigue siendo transparente. Las capas oscuras, separadas por intervalos transparentes iguales, son las huellas de los vientres de las ondas luminosas, es decir, de aquellas zonas donde se suman las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas, y donde la intensidad de la acción fotoquímica es máxima. La distancia entre las capas es igual a la mitad de la longitud de onda luminosa; para el color verde es igual a 0,5 micronos; para el rojo, 0,6, aproxi-

madamente, y para el violeta, 0,4. Por eso, en dependencia del color que tenga el lugar correspondiente de la imagen, varía la distancia entre las capas oscuras en las fotografías de Lippmann.

Precisamente en estas distancias se fija la información acerca del colorido de la imagen. La finura y el trabajo filigrano de la luz fue lo que cautivó a Víktor. Parecía que el gracioso entrelazado de vientres y nudos esperaba a su descifrador, como si este código no pudiera comprenderlo nadie. No obstante, la llave para descifrar las fotografías de Lippmann era muy simple. Había que ponerlas bajo un haz de viva luz blanca. La placa va a reflejarla de tal modo que de las partes donde las capas distan 0,25 micrones, partirán ondas intensas de luz verde; allí donde la distancia de las capas es de 0,3 micrones, veremos una luz roja, etc. Cada zona de la placa actúa como un filtro, como un filtro óptico, que separa del caos de la luz blanca únicamente las ondas cuya longitud es dos veces mayor que la distancia entre las capas de emulsión. Solamente que estas ondas se reflejan de cada capa en común acuerdo, de modo que cada onda reflejada se adiciona a las demás ondas reflejadas de otras capas. Las ondas cuya longitud no corresponde a la distancia entre las capas, se reflejan de éstas desordenadamente. Cada porción de luz "ajena", que se refleja de las distintas capas, tiene su fase, dirá el físico. Por eso las mismas, al superponerse, no se amplifican unas a las otras, sino que, mezclándose entre sí forman un fondo grisáceo indefinido que emborrona el color de las fotografías de Lippmann. Por lo demás, la calidad de estas fotografías la empeoraba también la naturaleza de la propia emulsión fotográfica. Sus gránulos de plata son, por

lo general, demasiado grandes para poder cifrar toda la gama luminosa del mundo real en el código de blanco y negro.

Una vez Denisiuk, en presencia de Víktor, junto con sus colegas, los posgraduados Kushpil y Subbotin, discutía los problemas de la creación científica. Era una conversación compleja y embrollada. Víktor retuvo en la memoria solamente un hecho que contó Denisiuk.

Resultaba que Lippmann soñaba también con el método de la reproducción precisa de la estructura volumétrica de los objetos y hasta realizó una gran labor en esta dirección. Mas ¿cómo explicar que este hombre, el primero que había logrado fijar en la emulsión fotográfica la distribución de los campos ondulatorios y que se encontraba ya en la recta que le llevaría directamente a la holografía — descubrimiento que poco más tarde concediera a Denisiuk el título de doctor en ciencias *honoris causa*, el título de miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS y el Premio Lenin — cómo explicar que haya escogido otro camino?

Quiso crear "la ventana al espacio de los objetos" y fue el primero que propuso aplicar para ello la óptica de trama, la misma en la que se basa el cine y las tarjetas en relieve. Mas ¿qué es esto, en comparación con la holografía, a la que él no pudo llegar? Lippmann retornó del camino de tanto alcance de la óptica ondulatoria para meterse en el atolladero de la óptica geométrica, del que ya no pudo salir.

La copia del mundo

Denisiuk gastaba mucho tiempo y fuerzas para preparar emulsiones de capas gruesas, que

reunieran gran poder resolutivo y alta sensibilidad, aunque no lo hacía para perfeccionar las fotografías en colores de Lippmann. Denisiuk, como realista y verdadero científico que era, no pretendía, ni mucho menos, competir de este modo con los métodos baratos y cómodos de la moderna fotografía en colores.

El iba hacia objetivos más importantes y difíciles. Su ambición era cifrar en la emulsión una amplia información acerca del mundo externo. Quería aprender a reproducir los objetos en toda su especificidad volumétrica. Quería obtener copias reales; deseaba hacer de la ficción una realidad.

Mirando la instalación de Denisiuk, Víktor, desde luego, se recordaba, y no sin razón, del método de Lippmann. Así, por una palabra se recuerda a veces hasta de la poesía completa.

No obstante, en los métodos de Denisiuk y de Lippmann no había más que una cosa común: en ambos métodos las ondas estacionarias de luz se fijan en el grosor de la emulsión fotográfica. Todo lo demás era distinto: la finalidad, el método de obtener ondas estacionarias y hasta la propia fuente de luz. En la instalación de Denisiuk, además de no haber cámara fotográfica, sin la cual es imposible obtener las fotografías de Lippmann, tampoco había objetivo fotográfico. En cambio, tenía que proteger su instalación de cualquier luz ajena y trabajar en un local oscuro.

A Víktor le sorprendía la sencillez de la instalación. Lo que más sitio ocupaba en la pesada mesa era la potente lámpara de vapor de mercurio situada en una caja metálica impermeable refrigerada con agua. La luz de la lámpara salía al exterior sólo a través de un filtro especial, no

dejando pasar más que una estrechísima parte del espectro. Esta luz se dividía en dos partes: una caía en un espejo plano y se reflejaba de él a la placa fotográfica; la otra iluminaba una escala minúscula fijada en un soporte especial. En la escala se veían rayitas finitas y pequeños números.

De la plena oscuridad, una luz verde mortecina hacía resaltar esta escala y la placa fotográfica rectangular. No se veía nada más. Todos los reflejos fortuitos eran absorbidos por las pesadas cortinas negras. Incluso la presencia del espejo y de la propia lámpara podía adivinarse solamente por el brillo de las partículas de polvo casuales. La exposición dura mucho, muchísimo tiempo. Después la placa pasa por los procedimientos habituales: el revelado, el fijado, el lavado y el secado.

Víktor examinaba atentamente estas placas, procurando hallar en ellas algún indicio de imagen. Mas todo era en vano. Las placas parecían grises, como si estuviesen veladas por un fotógrafo inexperto. Verdad es que bajo el microscopio se descubrían en ellas ornamentos fantasmagóricos ininteligibles. Mas a través del mismo tampoco se veía nada que se pareciera a la escala, cuya imagen debería estar fijada en la placa.

No obstante, tan pronto que esta placa se iluminaba con la luz brillante del sol o simplemente con la luz de una potente lámpara eléctrica, sucedía un milagro. Detrás de la placa aparecía una escala, exactamente igual a la que estaba aquí un tiempo atrás y que ahora se encontraba guardada en una cajita en la gaveta de la mesa.

A Víktor le sorprendía que la escala parecía

estar iluminada con una luz verde, a pesar de que la luz que caía sobre la placa era blanca. Pero no era eso lo más asombroso. Haciendo movimientos con la cabeza, se podía ver la escala desde distintas posiciones. Parecía tan real que intentaba uno cogerla, pero cuando estiraba la mano se encontraba con el vacío. ¡Allí donde los ojos veían claramente la escala, no había nada!

Seguramente que Denisiuk se sentía tan triunfante como aquel famoso pintor que dibujó una mosca y todo el que se aproximaba al lienzo deseaba espantarla. Dicen que esta mosca surgió como resultado de una competición entre dos pintores geniales que pretendían superar uno al otro en el carácter realista de sus obras.

Denisiuk no tenía rival aún; tampoco podía convencerse de un modo tan real de la fuerza de su arte. Mas nosotros debemos señalar que tenía rival, aunque en el otro extremo de Europa, pero Denisiuk lo desconocía por el momento y no podía comparar sus resultados con los del otro.

Mientras tanto, lo celebraba él solo. ¡Había logrado fijar la imagen del objeto y reproducirlo! No importa que en la propia placa no se vea nada semejante al objeto. Mas tampoco la palabra escrita se parece a su significado. No obstante, ésta refleja el mundo a su manera, y al hombre le es suficiente leerla para que restituya su sentido. La placa de Denisiuk hacía una cosa parecida. En ella no había la imagen habitual, pero con una iluminación adecuada aparecía detrás de la placa una imagen extraordinariamente real.

Denisiuk lamentaba muchísimo no poder enseñarle la placa a Yudin. Después de una lar-

ga y grave enfermedad, éste murió del cáncer de la garganta poco antes de terminar el experimento decisivo. Sólo le dio tiempo de ver la primera confirmación de las ideas de su posgraduado. Denisiuk preparó en su instalación la imagen de un espejo cóncavo, y esta imagen se comportaba como un verdadero espejo cóncavo: reunía los rayos de luz en un punto. Así como lo esperaba Denisiuk, la imagen del espejo hacía recordar la placa de zonas de Fresnel, pues las propiedades ópticas de la lente convexa y del espejo cóncavo son casi iguales.

Pero si bien la placa de zonas la preparaban, generalmente, con ayuda de un compás, Denisiuk obtuvo su "cifra" del espejo por un método puramente óptico. Además, esta "cifra" no era plana, como la habitual placa de zonas, sino que estaba compuesta de muchas capas; era volumétrica. Y gracias a eso, la placa de Denisiuk recogía y enfocaba únicamente los rayos de aquel color por cuyo medio se había obtenido en ella la imagen cifrada del espejo.

Yudin, que se encontraba ya muy enfermo, felicitó a su posgraduado con tan brillante éxito.

El antecesor

La muerte de Yudin fue un duro golpe para Denisiuk. En aquel tiempo todavía le consideraban una persona extravagante y sus trabajos no los tomaban en serio.

Poco más tarde, Denisiuk vivió otra conmoción. Uno de los colaboradores del Instituto de Optica, que acababa de regresar del extranjero, trajo una recopilación de anotaciones de informes, leídos en la conferencia en la que él había participado. En las anotaciones de uno de los

informes, que Denisiuk estimaba interesante, descubrió una alegación a un artículo de Denis Gabor. ¿Qué le había conmovido? Se apresuró a la biblioteca y — ¡qué horror! — leyó, clara y exactamente, lo que él había anotado en muchas variantes en su libreta de laboratorio.

Las mismas ideas acerca de la imperfección de la fotografía, las mismas ideas sobre la posibilidad de fijar el campo ondulatorio del objeto. A Denisiuk le pareció que había repetido un trabajo realizado por Gabor diez años antes...

Rebuscó todos los trabajos de Gabor que tenía a su alcance. Estuvo varios días y noches leyendo sin levantar cabeza... hasta que, por fin, se le alivió el corazón. Sí, ellos aspiraban a una misma finalidad, partían de las mismas premisas, pero fueron por vías distintas. En sus trabajos había mucho común. Mas había también distinciones extraordinariamente importantes. Y no eran simplemente distinciones. Cada cual había logrado algo diferente.

Denisiuk opinaba que la mejor manera de comprender el complejo problema era exponerlo a otro individuo. Por eso, recordándose de la escrupulosidad y el esmero del informe que había hecho Víktor en el seminario anterior, Denisiuk le propuso a éste que preparara un informe para el círculo estudiantil sobre los trabajos de Gabor y le ayudó con mucho gusto.

Denis Gabor, miembro de la Real Sociedad de Gran Bretaña, poseedor de muchos grados y títulos científicos, nació en Budapest, donde comenzó a estudiar electrotécnica después de terminar la escuela. En Berlín terminó la enseñanza especial; en 1927, recibió el diploma de doctor-ingeniero por el trabajo "Registro de los procesos transitorios en circuitos eléctricos con

ayuda del oscilógrafo catódico". En este trabajo, él fue el primero que utilizó, para registrar los procesos transitorios, la lente magnética con núcleo de hierro y el circuito electrónico biestable. Tanto lo uno como lo otro se utiliza mucho en los dispositivos especiales, incluyendo las computadoras, y en la mayoría de los televisores.

Gabor trabajó muchos años en Berlín investigando la descarga eléctrica en los gases, incluyendo también lo que ahora se denomina plasma. En el curso de estos trabajos inventó el método de unir el metal con el vidrio, aplicando bandas finas de molibdeno.

Poco tiempo después de que los fascistas ascendieron al poder, Gabor abandonó Berlín y se trasladó a Londres, en donde inventó el tubo catódico con memoria, muy utilizado en las computadoras y en los radares.

Como resultado de un prolongado trabajo, aquí inventó también un nuevo método de obtener imágenes.

En aquel tiempo, Gabor consideraba como tarea importantísima la de perfeccionar el microscopio electrónico. Este aparato se diferencia del corriente no por el principio de acción, sino por que aquí la imagen no la forman las ondas luminosas, sino los electrones que inciden en la emulsión fotográfica después de pasar a través del objeto a investigar. En el lugar de la emulsión, donde había caído un electrón, aparece un ennegrecimiento después del revelado. Allí donde cayó un número mayor de electrones, el ennegrecimiento es más intenso.

Las lentes que se utilizan en el microscopio electrónico se distinguen, desde luego, de las lentes ópticas. Son lentes magnéticas o eléctricas,

cuyos arrollamientos o electrodos crean correspondientemente campos magnéticos o eléctricos que distorsionan las trayectorias de vuelo de los electrones, análogamente a como las lentes ópticas distorsionan los rayos luminosos. A pesar de la esencial diferencia física de estas lentes, los resultados de su acción son bastante próximos.

El microscopio electrónico, igual que el óptico, forma en el plano, en que está situada la emulsión fotográfica, una imagen clara y precisa, pero solamente de una pequeña parte del objeto que se está investigando. La nitidez de la imagen de las otras partes se obtiene mediante el desplazamiento correspondiente de la emulsión, así como alterando la corriente que pasa a través de las lentes magnéticas o la tensión en las lentes eléctricas. Es imposible obtener simultáneamente en la emulsión una imagen nítida en todo el grosor del objeto. Las partes del objeto que han quedado fuera del foco, sólo dan en la fotografía un fondo que empeora la calidad de la imagen y no da información complementaria alguna acerca del objeto.

Gabor volvía una y otra vez a la idea de que el flujo de electrones que pasaron a través del objeto, llevaba consigo una información completa acerca de todas las interacciones experimentadas por los electrones en el grosor del objeto. Y en él habíase fortalecido la aspiración a hallar el método para utilizar esa información. Comprendía que el éxito alcanzado en la solución de este problema especial tendría una significación mucho más amplia. Pues también la luz que cae sobre el objetivo de la cámara fotográfica o sobre la pupila del ojo, contiene amplia información acerca de todos los objetos, de donde

parte la luz. Sin embargo, ni el ojo, ni la cámara fotográfica, ni tampoco el microscopio electrónico pueden crear simultáneamente una imagen nítida de todos los detalles, independientemente del lugar en que se encuentren éstos. Tal es la naturaleza de la formación de la imagen con ayuda de lentes. Las lentes reproducen en el plano solamente los objetos planos, situados en determinados planos "conjugados". El ennegrecimiento de la emulsión fotográfica es proporcional a la intensidad de los flujos influyentes de fotones o electrones. Como resultado, la emulsión fotográfica fija solamente una parte insignificante de información transportada por la luz o los electrones.

Gabor fue el primero que contrapuso la pobreza de la imagen fotográfica a la riqueza de la información que contiene el flujo luminoso o electrónico. Indicó también el camino para superar esta divergencia.

El éxito de Gabor

El camino que Gabor había propuesto sigue pareciendo paradójico hasta hoy día. Este se componía de varios saltos.

Primero: negarse de la utilización de las lentes, pues, al formar la imagen de un plano del objeto, las lentes conducen a la pérdida de la información restante, que constituye, además, su mayor parte.

Segundo: que en la emulsión fotográfica no se fije la imagen del objeto, sino, en la medida posible, toda la información acerca de éste, transportada por el haz de electrones o por los rayos de luz.



Tercero: utilizar la información impresa para crear ulteriormente haces de luz que lleven consigo toda esta información.

Cuarto: formar con ayuda de estos haces de luz la imagen de aquel objeto, la información sobre el cual se había fijado en la primera etapa del proceso.

Gabor subrayaba que la diferencia radical

entre el nuevo método y la fotografía corriente, la cual imprime la imagen en la emulsión fotográfica de un golpe, consiste en que el proceso para obtener la imagen se divide en dos etapas que transcurren en momentos distintos y en completa independencia. Primero, en la emulsión fotográfica se hace la impresión de la información acerca del objeto, contenida en el flujo de luz o de electrones que interaccionan con dicho objeto. Después del revelado, la información impresa puede conservarse el tiempo que se quiera, y, cuando haga falta, se comienza la segunda etapa, o sea, la reconstitución de la imagen basada en esta información. Gabor denominó a su método holografía, recurriendo, como suele ocurrir a la lengua griega. "Holograma" significa "plena impresión". La restitución de la imagen por medio de hologramas la llamó "reconstrucción".

Al examinar el holograma a simple vista o incluso bajo el microscopio es imposible descubrir en él imagen alguna del objeto. A simple vista parece que la placa está estropeada. Bajo el microscopio se observa una acumulación caótica de pequeñísimas manchitas formando dibujos en algunas partes, que hacen recordar las cabrillas que levantan las ráfagas de viento en la superficie del agua de un estanque tranquilo.

Todo quien tenga la más mínima experiencia en fotografía, comprenderá que no se puede obtener semejante impresión situando simplemente la emulsión fotográfica en el camino del flujo de los electrones o de la luz, que interaccionaron con el objeto. La emulsión fotográfica que reacciona únicamente a la intensidad del flujo de por sí es capaz de fijar sólo la mínima parte de la información contenida en este flujo. Un in-

tento ingenuo de esta índole producirá inevitablemente el deterioro de la placa. Un fotógrafo aficionado lo llama placa velada.

Para que la información impresa resulte más completa, es necesario adoptar medidas especiales. El mérito de Gabor consiste en que no sólo había comprendido la debilidad de los métodos conocidos, sino que propuso un método nuevo y halló el modo de su realización.

Gabor originalmente trabajaba con el microscopio electrónico, pero sus ideas eran muy universales y aplicables a todos los casos en que la información acerca de algún objeto es transportada por ondas. Estas pueden ser también ondas sonoras. El microscopio electrónico representa solamente un caso particular. Para su funcionamiento es esencial que los electrones se sometan a las leyes ondulatorias. Las propiedades ondulatorias de los electrones prevalecen en el microscopio electrónico en la misma medida en que sus propiedades corpusculares juegan el papel principal en el trabajo de las lámparas de radio y de las fotocélulas.

Cuando preparaba el informe para el seminario, Víktor estudió atentamente los artículos de Gabor que pudo conseguir.

A él, como a Denisiuk, le cautivaron los trabajos de Gabor e interesó la propia personalidad del sabio. Ambos se asombraban de los multifacéticos intereses de Gabor, así como del amplio enfoque de los problemas que parecían locales. Les parecía que era un individuo atractivo y hasta algo enigmático. Incluso la biografía de este sabio, de sesenta años de edad, era singular y admiraba con su inconsecuente generosidad y prodigalidad de las ideas científicas. Denisiuk y Víktor pensaban mucho en él y hacían conjeturas

acerca de sus perspectivas científicas. El informe resultó estar preparado en común.

Para contarles a los compañeros cómo se manifiesta la esencia ondulatoria de los electrones en el microscopio electrónico y poder transmitir la profundidad de las ideas de Gabor, Víktor no recurrió a la ayuda de la física cuántica ni siquiera citó la variante precoz de la mecánica cuántica, que es la teoría ondulatoria de De Broglie.

— Es suficiente aceptar como un hecho experimental — señalaba Víktor en el prefacio — que todo aquello que es producto de la acción de las ondas luminosas durante el trabajo del microscopio óptico, se observa también en el microscopio electrónico. Todo, a excepción de la escala, pues la longitud de las ondas de luz visible está en los límites entre 0,4 y 0,8 micrones, mientras que las ondas relacionadas con los electrones son mucho más cortas.

Las burlas de la ondina

Víktor no comenzó su relato por la luz, sino por las ondas que corren por la superficie del agua después de caer una piedra. El recurrió a la ayuda de los pequeños gnomos que viven en la orilla del estanque y que no pueden ver lo que ocurre en el centro del mismo.

Si ellos observaran — decía Víktor — las olas que llegan a la orilla cuando el tiempo está tranquilo, podrían enterarse de muchas cosas. Por ejemplo, si las olas tienen la forma de segmentos circulares, eso quiere decir que salen de algún centro. Después de establecer cómo van las tangentes en dos puntos de esta onda, los gnomos determinarán con facilidad no sólo la distancia

que hay hasta el punto de donde ha salido la ola, sino también su posición exacta en la superficie del estanque.

Ahora imagínense ustedes — continuaba Víktor — que la ondina que vive en el estanque quiso burlarse de nuestros gnomos por haberse éstos jactado demasiado de su habilidad. Ella cogió el arco de Amor y apuntó contra un gnomo, pero en vez de soltar la flecha mortífera, torció el arco horizontalmente y golpeó con él la superficie del agua. ¿Se imaginan ustedes qué carcajadas daría la ondina cuando el ingenuo gnomo le haya comunicado las coordenadas precisas del lugar de caída de la piedra? Y cómo ella, con el aplomo de una estudiante del primer curso, demostraba que el arco, combado en forma circular, había excitado una onda, la cual era imposible diferenciar de la onda engendrada por la piedra, si la observamos solamente en un pequeño sector de la alejada orilla. Y la ondina tenía razón — concluyó Víktor ya serio —, pues incluso habiendo millones de gnomos colocados bien juntitos alrededor de todo el estanque, ellos no podían decir si la piedra cayó en la superficie del agua o fue la bella ondina quien lanzó allí su arco.

La moraleja es sencilla. Sabiendo qué información transmite la onda, es posible crear con distinto método otra onda idéntica y reproducir esta información una vez más, sin repetir el acontecimiento que sirvió de su fuente originaria.

Dos piedras que caen simultáneamente al agua excitan dos sistemas anulares de ondas. Cuanto mayor sea el número de piedras tanto más complicado será el cuadro que forman las ondas. Mas, conociendo las leyes de física y efec-

tuando atentamente las observaciones necesarias, no sólo puede esclarecerse en qué puntos deberán caer las piedras, sino también reproducir estas ondas actuando sobre la superficie del agua con patrones que tengan la forma correspondiente.

Gabor planteó y solucionó un problema precisamente así. Halló el modo de fijar la onda que interactuaba con el objeto de observación, de manera que fuese posible más tarde reproducir una onda igual todas las veces que se quiera. Gabor determinó con cuántos detalles era necesario efectuar la fijación de la información acerca de la onda a imprimir para que la onda que se reconstruye reprodujera información sobre el objeto. Indicó la vía por la que podía alcanzarse el objetivo planteado y confirmó experimentalmente que el nuevo método es correcto.

Para fijar la onda luminosa que reproducía el objeto, ponía en su camino una placa fotográfica y dirigía hacia ella parte de luz directamente de la fuente que iluminaba el objeto. Al sumarse entre sí, ambas ondas formaban un sistema de ondas estacionarias, que era precisamente lo que se fijaba en la emulsión después de su revelado, en forma de un sistema de pequeñísimas rayitas oscuras y claras. Así se obtenía el holograma. Después Gabor dirigía hacia el holograma la luz de esa misma fuente. Aquí sucedía una cosa asombrosa. Las rayas oscuras del holograma eliminaban de la luz todo lo excedente, lo que no llevaba información acerca del objeto, y dejaban pasar a través de sí únicamente las ondas luminosas idénticas a las que durante la obtención del holograma le llegaban del objeto.

Ahora, si la luz que había pasado a través

del holograma caía en el ojo del observador, éste se hacía la completa ilusión de que allí, tras el holograma, había un objeto real.

— No obstante — terminó Víktor —, a pesar del indudable alcance que tenían los trabajos de Gabor, éstos no se desarrollaron. Es más, quedaron olvidados por mucho tiempo. El motivo se debe a la ausencia de fuentes de luz necesarias para la realización eficaz de las ideas de Gabor.

Ahora podríamos decir: Gabor, igual que un buen explorador, actuaba muy por delante del frente de la ciencia y la técnica. Además, el informe de Víktor se refería a una época anterior al láser. Desarrollando sus razonamientos, puede caracterizarse la situación, que no ha cambiado tampoco para el comienzo de los trabajos de Denisiuk, con el ejemplo siguiente. La cosa residía en lo siguiente: era como si la ondina, deseando burlarse otra vez más de los gnomos, hubiese triturado la piedra hasta polvo fino y lo hubiese tirado al agua. El resultado era que a la orilla del estanque no llegaron más que unas cabrillas tan débiles y desordenadas, que los gnomos no podían comprender nada, ni siquiera con la ayuda de la más perfecta computadora electrónica.

Todas las fuentes luminosas que existían cuando Gabor hizo los primeros trabajos, lo mismo que las otras fuentes que vemos ahora en condiciones habituales, excitan ondas luminosas aproximadamente de igual manera que los granos de arena en el experimento de nuestra ondina. Cada partícula en el filamento de la lámpara de incandescencia, cada átomo en la lámpara de descarga luminiscente emiten ondas luminosas independientemente de los demás y nuestro ojo

está adaptado a eso. Solamente reacciona ante la intensidad de la luz. De una manera igual se porta la emulsión fotográfica. Para ambos no tiene importancia la fina estructura de las ondas que llegan, sino la energía completa que es transportada por todas las ondas. Mejor dicho, el ojo y la emulsión fotográfica fijan la distribución de la energía luminosa por la superficie fotosensible. Pero los datos acerca de la distribución de la energía no son suficientes para poder reproducir una vez más la totalidad de las ondas que actúan en la emulsión fotográfica.

Gabor efectuaba sus experimentos con ondas luminosas. El experimento con electrones era mucho más complicado y, además, la necesidad de éste había dejado de ser actual en cierta medida. Para ese tiempo, otros investigadores habían ya perfeccionado considerablemente el microscopio electrónico, así que la metodología, inacabada aún, de Gabor quedó incapaz de competir con ellos.

No obstante, según demostraron otros artículos de Gabor, que aparecían en abundancia en las revistas científicas, el sabio no estaba desalentado. En la ciencia quedaban muchos problemas por solucionar, capaces de atraer al verdadero investigador, y él se dedicó a otras cuestiones, abandonando por mucho tiempo el trabajo "desafortunado". Gabor construyó una variante estructural en la teoría de la información, variante que se diferenciaba mucho de la teoría estadística de Wiener — Kotélnikov — Shannon. Solucionó la enigmática paradoja de Langmuir explicando por qué y cómo los electrones en un plasma frío son capaces de llegar con inesperada rapidez al estado de equilibrio, es decir, al estado de Maxwell.

Añadiremos lo que no podía saber Víktor cuando informaba entonces, en 1959, sobre los trabajos de Gabor. Este sabio tiene ahora setenta años, mas continúa trabajando activamente. Se interesa mucho por los problemas sociales. Su libro "Inventing the future", editado en 1963 y traducido a siete idiomas, ejerció notable influencia en la futurología moderna, ciencia que tiene por objeto pronosticar científicamente el futuro desarrollo de la sociedad humana, incluyendo la ciencia y muchas otras cosas. Gabor trabaja también en la construcción de una pantalla de televisión plana, que puede colgarse en la pared como un cuadro...

La holografía volumétrica

Después de estudiar atentamente los trabajos de Gabor y de compararlos con los suyos, Denisiuk pudo establecer con plena evidencia tanto la comunidad de sus ideas como su profunda diferencia.

Lo común aquí era el problema de la reproducción del objeto mediante la fijación del campo ondulatorio que partía del objeto. Era común el método de fijación, basado en la comparación de este campo ondulatorio con el campo de ondas de referencia; por ejemplo, con el campo de ondas esféricas. Y, por fin, común era el método de descifrar la impresión, durante el cual se enviaba al holograma (a Denisiuk le gustó ese término) una onda cuya estructura era igual que la de la onda de referencia, utilizada durante la obtención del holograma. Con ello se limitaban los rasgos comunes. En su fondo resaltaba claramente la diferencia y se veían bien las causas por las cuales los científicos habían tomado dis-

tintos caminos. Gabor había partido del microscopio electrónico. Es posible que precisamente por eso en sus experimentos ópticos el haz de referencia de luz se dirigía a la placa por el mismo lado que la luz desde el objeto.

Denisiuk, aunque es posible que lo hiciese inconscientemente, se apoyaba en el experimento de Lippmann, en el que estos haces de luz caían sobre la emulsión desde los distintos lados. Los máximos interferenciales en los experimentos de Gabor estaban relativamente lejos uno del otro, y en cada sector de la emulsión se contaba con uno de ellos, nada más. Puede decirse que la emulsión daba una sección plana del campo de ondas estacionarias. En los experimentos de Denisiuk los máximos interferenciales estaban situados muy cerca uno del otro, así que en el grosor de la emulsión cabían muchos de esos máximos. En la emulsión se fijaba la estructura volumétrica de las ondas estacionarias. Por eso a Denisiuk, naturalmente, le hacían falta emulsiones de alta calidad.

Estas diferencias, que parecían insignificantes, conducían a consecuencias sustanciales. Descifrar los hologramas planos de Gabor y examinar el objeto que estaba fijado en ellos era posible solamente con una luz tan monocromática (unicolor), como aquella con la que se había obtenido el holograma. Pero la escasa sensibilidad del ojo conducía en este caso a la brusca limitación del volumen del espacio representado por el holograma. Para que aumente el volumen hay que hacer más estrecho el espectro, mas el empleo de filtros de banda pasante estrecha disminuye el brillo de la luz y entonces el ojo no ve nada.

Los hologramas volumétricos de Denisiuk pue-

den verse con luz blanca viva. Ellos mismos, análogamente a las fotografías de Lippmann, filtran la parte necesaria del espectro. Y el empleo de filtros de banda pasante estrecha durante la obtención de los hologramas no se limita con la sensibilidad del ojo. Esto conduce solamente al aumento del tiempo de exposición. Esta diferencia de por sí le daba ya a Denisiuk la posibilidad de utilizar la holografía allí, donde el método de Gabor era inaplicable.

Mas se descubrió también otra diferencia esencial. Al examinar los hologramas de Gabor se formaban al mismo tiempo dos imágenes del objeto: la real, semejante a la que se ve a través de un lente convexo, y la virtual, análoga a la que surge en un espejo corriente. Las imágenes se superponían una sobre la otra provocando interferencias mutuas.

El método de Denisiuk conducía a la reconstitución simultánea de una sola imagen del objeto. Esto podía ser la imagen real o la virtual, en dependencia del lado del que se dirigía el haz de luz hacia el holograma durante la reconstitución de la imagen. Merced a esta propiedad de la holografía volumétrica, no surgían las distorsiones que eran propias del método de Gabor.

No menos evidentes eran también las diferencias entre el holograma volumétrico de Denisiuk y la fotografía en colores de Lippmann, aunque les unía el que los dos se basaban en el surgimiento de un sistema espacial en el grosor de la emulsión, sistema correspondiente a la distribución de vientres de ondas estacionarias luminosas. En las fotografías de Lippmann la luz blanca, reflejada del objeto, cae en el objetivo y éste dibuja la imagen plana del objeto en la

emulsión. El espejo de mercurio, reflejando atrás la luz que había pasado por la emulsión, forma en ella el sistema de ondas estacionarias. Después del revelado, en la emulsión aparecen capas de ennegrecimiento que separan de la luz blanca los colores que "pintan" la imagen. Todos los datos acerca de la estructura espacial del objeto se pierden a consecuencia de la combinación de las propiedades específicas del objetivo y de la emulsión fotográfica.

En el holograma de Denisiuk, el espejo que origina el haz de referencia de luz está algo separado de la emulsión. Denisiuk se vale de la luz monocromática ordenada por el filtro y separada de la radiación de la lámpara de vapor de mercurio. Y sacrifica la reproducción de los colores del objeto. Pero puede pasarse sin objetivo, sin la formación directa de la imagen, y gracias a esto adquiere la posibilidad de fijar totalmente la información acerca de la estructura espacial del objeto y de su forma.

Mas Denisiuk llama volumétrico a su holograma no porque éste sea capaz de reproducir la forma espacial del objeto, lo cual puede lograrse también con ayuda del holograma plano de Gabor, sino porque su holograma se forma en todo el volumen de la emulsión de capa gruesa. Esto es lo único que le permite reconstruir la imagen en luz blanca y evitar las distorsiones propias de los hologramas de Gabor.

A diferencia de Gabor, Denisiuk no cesaba el trabajo en el campo de la holografía. La cosa avanzaba lentamente. El principal obstáculo seguía siendo la ausencia de una fuente de luz adecuada. Mas es posible que Denisiuk presintiera la futura revolución en esta rama, pues la electrónica cuántica ya en aquel entonces había

alcanzado un alto nivel de desarrollo. Denisiuk no se dedicaba a ella: le bastaban sus problemas. No obstante, seguía atentamente los trabajos de Básov y Prójorov, así como los artículos de otros científicos soviéticos y extranjeros.

Desde luego, también para Denisiuk la noticia acerca de la creación del primer láser fue una sorpresa. Se puede comprender el profundo parentesco que existe entre las ondas hertzianas y la luz y reconocer la posibilidad, en principio, de obtener ondas ópticas que por su ordenación —coherencia— no ceden a las ondas hertzianas; observar cómo Básov, Prójorov y Townes con sus colaboradores marchan en esta dirección. Pero quién podría predecir que precisamente en 1960, casi a un mismo tiempo, Maiman creara el láser a rubí y Javan con sus colaboradores, el láser a mezcla de helio y neón.

Naturalmente, los primeros láseres eran imperfectos, pero estaba clara la cercana perspectiva. Merced a los esfuerzos de muchos científicos, ésta se convirtió pronto en una realidad. Los láseres ya son tan estables que con un sistema de ondas luminosas estacionarias ordenadas pueden cubrir volúmenes de dimensiones de muchos metros cúbicos.

Eso era precisamente lo que le hacía falta a la holografía. Ante ésta se abrían ahora enormes posibilidades.

No cabe la menor duda de que Denisiuk comenzó en seguida a trabajar con los láseres. Estos, originalmente, no proporcionaron cambios en su método. Sólo que con ellos era más cómodo y más fácil trabajar. Sustituyendo la lámpara de vapor de mercurio con el filtro por el láser, Denisiuk pudo obtener el holograma mucho más rápidamente y, en una serie de casos, los obtenía

prácticamente al instante. Esto era una circunstancia muy importante.

Ahora, la holografía no sólo tiene que tratar con objetos en miniatura especialmente preparados ni tampoco con las piezas de ajedrez y juguetes, sino con los objetos de la vida habitual y la técnica, y en la técnica la rapidez de investigación juega un papel primordial.

El láser aportó otro logro muy importante a los trabajos de Denisiuk. El holograma volumétrico es capaz de recordar una información tan completa acerca del objeto que iluminándolo con tres láseres de radiación azul, verde y encarnada, Denisiuk consiguió hologramas que bajo la luz solar no sólo daban una imagen volumétrica, sino también policroma.

Pero Denisiuk es realista, sabe apreciar sensatamente tanto las necesidades de la técnica, como del arte. El no pretendía, ni mucho menos, valerse de eso para competir con las baratas y cómodas emulsiones fotográficas modernas que fijan la imagen en colores con la iluminación natural, codificando directamente la imagen en los tres colores básicos. Vio en los láseres un medio para obtener imágenes que fuesen a la vez volumétricas y en colores.

Los competidores

Al poco tiempo se supo que el holograma de Denisiuk no era la única variante posible de la holografía a base de la emisión láser. El láser resultó ser un arma muy flexible que todos podían emplear a su manera. Pues también un simple lápiz en manos de distintas personas da resultados disímiles: uno escribe una novela; otro, un soneto; el tercero, un parte. Indepen-

dientemente de Denisiuk y después de aparecer los láseres, comenzaron las investigaciones en la rama de la holografía los colaboradores de la Universidad de Michigan, Leith y Upatnieks. Antes habíanse especializado en la radiofísica y les era fácil sentir la comunidad de principio que existía entre las ideas de Gabor y algunos métodos que se utilizaban en la radiotécnica desde hace tiempo. Por eso, sin ninguna duda, pudieron prever las posibilidades, extraordinariamente amplias, que se abrían ante la holografía con el empleo de los láseres, estos ministros plenipotenciarios de la radiotécnica en el reino de la óptica.

El transmisor emite al espacio ondas hertzianas de una frecuencia totalmente determinada. Las mismas son coherentes en sumo grado. Pero en esta forma las ondas hertzianas llevan la cantidad mínima de información. Luego de que éstas se reciben, lo único que podemos saber es que el receptor está conectado, medir su frecuencia y determinar el lugar de dislocación.

Para transmitir por radio cualquier información es necesario perturbar la constancia de las ondas hertzianas, introducir en ellas la información que se quiera transmitir. Para esto, podemos variar la amplitud, la frecuencia o la fase de la onda. Dicho procedimiento se denomina modulación: modulación de amplitud, de frecuencia o de fase, respectivamente. A la onda hertziana, con la que se efectúa ese procedimiento, los radistas la llaman onda portadora.

Para que en el lugar de la recepción pueda extraerse de la onda portadora modulada la información, que ésta lleva consigo, es menester efectuar una operación inversa a la modulación: la demodulación. Como resultado, se for-

man señales por medio de las cuales en la pantalla del televisor se reconstituyen las imágenes transmitidas, o también con la ayuda de un altavoz se restituye el sonido transmitido.

Uno de los métodos más simples que ahora casi no se usa en la radiotécnica es la recepción heterodina. La portadora modulada se mezcla en el receptor con la señal del oscilador local. Esta señal de referencia coincide exactamente en frecuencia con la señal del transmisor, y un simple dispositivo hace que se reste de la señal que se recibe. En la diferencia se queda lo que se introdujo en la portadora durante el proceso de modulación. Queda la información, cuya transmisión constituye precisamente la finalidad de la radiocomunicación. Leith y Upatnieks comprendieron que la aplicación del láser permite realizar las ideas de Gabor por una vía totalmente análoga.

La luz del láser, que posee alto grado de coherencia, juega el papel de portadora. Al dispersarse la luz del objeto, se infringe la rigurosa constancia de las ondas de láser. Esto no es más que la modulación. Los distintos puntos del objeto influyen de manera diferente en la amplitud y en la fase del sector correspondiente de la onda. Cada punto del objeto transforma su parte incidente de la onda en él, en una onda esférica dispersiva, portadora de la información acerca de las propiedades ópticas de ese punto de la superficie del objeto. Todo el sistema de ondas que se dispersan del objeto contiene la más completa información (de la posible información óptica) acerca del objeto. Si una parte de estas ondas cae en nuestro ojo, veremos el objeto.

Leith y Upatnieks se plantearon la tarea de

fijar en la emulsión fotográfica toda la información que contiene la luz del láser dispersada por el objeto. Colocaron una placa fotográfica de tal modo que cayera en ella parte de las ondas dispersadas, y con ayuda de un espejo le dirigieron un haz de luz directamente del láser. Por analogía con la radiotécnica, lo denominaron haz de referencia.

En el proceso de interacción de la onda, que llegó del objeto, y la onda de referencia, el método de Leith y Upatnieks no se diferencia en absoluto del método de Denisiuk. En aquella parte del espacio, en la que el haz de referencia de luz se sobrepone a la luz dispersa, surge el sistema de ondas estacionarias. Dichas ondas perciben toda la modulación que el objeto aporta a la luz que sobre éste incide. De este modo, la información completa acerca del objeto se transmite a la onda estacionaria. Pero como a cada punto del espacio llegan, de cada uno de los puntos de la superficie del objeto, ondas dispersas, esta información queda impresa en cualquier punto de la onda estacionaria. La información se fija igualmente en cada punto de la placa fotográfica situada en un lugar donde simultáneamente puede actuar sobre ella la luz dispersada por el objeto y el haz de referencia.

La diferencia radical con el método de Denisiuk se manifiesta en la etapa de interacción de la luz y la placa. Leith y Upatnieks, igual que Gabor, utilizaban placas cubiertas con una capa delgada de emulsión. Por eso en sus placas no cabían a la vez varios vientres de la onda estacionaria. Tampoco se formaba nada parecido al filtro óptico de capas múltiples, que a Denisiuk le permitió restituir la imagen por medio de la luz blanca.

La emulsión de capas delgadas atraviesa el sistema de ondas estacionarias, igual que la sierra un tronco, descubriendo el sistema oculto de anillos anuales. Como resultado, en la emulsión se forma un dibujo muy complejo, en el que está comprendida toda la información. La diferencia en el grosor de la capa de emulsión fotográfica fue lo que produjo la diversidad sustancial en la estructura del holograma, y esto, naturalmente, dejó sus huellas en la etapa de restauración de la imagen.

El holograma que Leith y Upatnieks obtuvieron había que iluminarlo con luz de láser; ésta desempeñaba la misma función que la señal del heterodino en el radiorreceptor. Pasando a través del holograma, la luz resulta ser modulada, percibiendo toda la información que contiene el holograma. Al mirar a través del holograma, se ve, igual que en el método de Denisiuk, la imagen estereoscópica del objeto, que parece estar en vilo detrás del holograma. Aquí aparecen todos los efectos que ya conocemos, mas a diferencia del precedente, el color de la imagen no coincide con el color del objeto, sino con el del haz de láser.

La diferencia esencial que existe entre el holograma plano y el holograma volumétrico se pone de manifiesto al intentar utilizar luz blanca para reconstruir la imagen. El holograma volumétrico de Denisiuk, que actúa igual que un filtro interferencial de capas múltiples, selecciona de la luz blanca aquella longitud de onda, mediante la cual habíase obtenido el holograma, así que la imagen reproducida tiene exactamente el mismo color. El holograma plano se compone de una sola capa llena de puntos y líneas, que se formaron a consecuencia de que el plano de la

emulsión fotográfica cortó el espacio relleno por la onda estacionaria. Este holograma no puede realizar una tal tarea. Al iluminarlo con luz blanca, no dará nada en absoluto.

El holograma plano, igual que el volumétrico contiene una información completa referente a la forma del objeto, pero, a diferencia del holograma volumétrico, el plano no contiene información acerca del color del objeto.

La realidad y la ilusión

No obstante, éste es precisamente aquel caso en que la debilidad se convierte en fuerza. Debido a que el holograma plano no posee las propiedades de un filtro de capas múltiples y es insensible al color del objeto, nosotros podemos reconstruir la imagen impresa en él por medio de un láser cualquiera, y no sólo por el usado durante la obtención del holograma. Es más, si al reproducir el holograma plano se utiliza una radiación de mayor longitud de ondas, que cuando se hace la impresión, resultará aumentada la imagen. Por ejemplo, si el holograma fue obtenido en rayos ultravioletas con longitud de 0,23 micrones y la imagen se reconstruye por medio del láser a rubí, el aumento equivaldrá a tres. Para los hologramas, obtenidos en rayos Roentgen o con ayuda del microscopio electrónico y que se restituyen en la luz visible, el aumento alcanzará centenas de veces. Luego hablaremos más detalladamente acerca del microscopio holográfico, que proporciona aumentos aún mayores. Ahora trataremos de comprender cómo produce ese método la ilusión en colores.

Si al holograma plano se le ilumina con luz blanca, en él surgirán simultáneamente muchí-

simas imágenos del mismo objeto, pero cada una será en un color y en distinta escala: las imágenes rojas al ¡máximo serán dos veces mayores que las imágenes violotas más intensas. Y todas las imágenes forman ante los ojos del observador un velo gris.

No obstante, con ayuda del holograma plano puede obtenerse una imagen volumétrica tricolor. Para esto es preciso imprimir en un holograma la información acerca del objeto en tres colores — azul, verdo y rojo — y aplicar simultáneamente, al reconstituirse la imagen, tres láseres con osos mismos colores.

La segunda diferencia importante entre el holograma plano y el volumétrico consiste en que se producen simultáneamente dos imágenes del objeto: la real y la virtual. Se llama imagen real aquella que so forma sobre una pantalla; por ejemplo, en la pantalla de cine o en la placa fotográfica que está dotrás dol objetivo. La imagen virtual, en cambio, es imposiblo observarla directamente en la pantalla. Es necesario transformarla previamente en imagen real con ayuda de una lente convexa. Sin embargo, la imagen virtual se puede ver a simple vista debido a que el cristalino, como lente convexa, la transforma en la retina on imagon real. La cuestión consiste en que el holograma plano no posee la propiedad de un filtro óptico de capas múltiples. El haz de reforencia do los rayos láser, que sirvo para reconstruir la imagen, al llegar al holograma plano so desdobla en tres haces. (En roalidad, surgen varios hacos más, pero son tan débiles que no juegan ningún papel en la formación de la imagen.) Uno de estos haces es la continuación del haz de referencia, quo para nosotros no tiene importancia alguna. El segundo,

que forma un ángulo con el primero, está compuesto de rayos divergentes. Son una copia exacta de los rayos divergentes de la luz difusa, que partieron del objeto en el momento de obtener el holograma. El tercero forma la imagen real.

La gran intensidad y la alta coherencia de la luz de los láseres permitieron a Leith y Upatnieks situar el espejo lejos de la placa fotográfica; además, de tal modo que el haz de referencia de la luz que viene del espejo cae sobre la placa con inclinación hacia la luz dispersa por el objeto. Merced a esto, durante la reconstitución del holograma no se sobreponen la imagen real y la imagen virtual, lo cual no deja que se produzcan las distorsiones propias del método originario de Gabor.

He aquí lo que relató acerca de la holografía un científico que está trabajando activamente en su aplicación.

— Puede uno imaginarse — decía éste — que los rayos de la luz difusa, los cuales, durante la obtención del holograma por acción del haz de referencia fueron transformados en el sistema de ondas estacionarias, se "congelaron aprisionados" en el holograma. En cambio, el haz de referencia aplicado para la reconstitución de la imagen los "descongela" y las ondas luminosas, como si no hubiese ocurrido nada, continuaban su viaje. Si éstas caen ahora a la vista de un observador, él verá el mismo cuadro que si el objeto estuviese en el lugar de antes. El objeto parece que se encuentra detrás del holograma, como si estuviera al otro lado de la ventana. Y moviendo la cabeza, el observador podrá contemplarlo desde distintos puntos de vista, formándose una impresión completa del carácter estereoscópico del objeto real. La imagen es, desde

luego, virtual. Si ponemos en vez dol ojo una pantalla, no veremos la imagen on ella. Sin ombargo, sí la podemos obtenor poniendo una lente convexa entre ol holograma y la pantalla. Desplazando la lente con rolación a la pantalla, se obtienen imágenes nítidas de los distintas partes dol objeto, igual quo ocurro en las cámaras fotográficas o al utilizar el anteojo.

Mas esto no es todo — continuó —; del holograma brota otro haz de luz quo contiene información sobre el objeto. Está compuesto de rayos convergentes que se unen en los puntos situados delante del holograma, ostrictamento simétricos a los puntos donde detrás del holograma convergen las continuaciones no oxistentes de los rayos divorgontes del haz quo forma la imagen virtual. Si se llenara con humo aquella región del espacio, adonde están dirigidos los rayos convergentes, la imagen real aparecerá en toda su naturalidad. Parece como si está colgando en esto velo de humo. Y si usted se sitúa, con relación al holograma, en un lugar desde donde se divisa a través del holograma la imagen virtual, aparecerá una ilusión sorprendente. Luego, dirigiendo la mirada de la nube de humo con la imagen real en vilo, al holograma, detrás dol cual se vo la imagen virtual, usted se sentirá igual que si estuviera anto un espejo. La imagen real le parecorá un objeto real, mientras que la imagen virtual, su imagen especular.

Es más, si situamos una pantalla blanca donde se encuentra la imagen real, en la pantalla aparecorá una imagen brillante y nítida. Alejando y aproximando un poquito la pantalla con respecto al holograma, lograríamos hacor más nítidas tal o cual parte de la imagen. ¡Y esto es

posible sin ninguna necesidad de lentes! Pues las lentes no se utilizan ni al ejercerse la impresión, ni al realizarse la reproducción del holograma.

En los hologramas volumétricos de Denisiuk se puede obtener también la imagen real. Lo único que hace falta es dirigir hacia éste el haz de referencia de luz en sentido opuesto al de antes. Dejando entrar el humo al lugar donde antes, a través del holograma, veíamos la imagen virtual, ahora veremos la imagen real. Naturalmente que es imposible verlas al mismo tiempo.

A pesar de las grandes ventajas que poseen los hologramas volumétricos — la posibilidad de restituir la imagen con la luz blanca sin necesidad de emplear el láser, así como de obtener una imagen en vez de varias, como en el caso de los hologramas planos —, los hologramas planos tienen hoy día mayor aplicación, lo cual se debe a causas puramente técnicas. Las emulsiones fotográficas de capa gruesa actuales absorben la luz de manera perceptible. Por eso, cuanto más profunda sea la capa de emulsión, menos información ella recibirá, principalmente acerca de aquellos detalles del objeto que están menos iluminados o que reflejan peor la luz.

Para los hologramas planos se utilizan emulsiones cuyo grosor es menor que la mitad de la longitud de onda del láser utilizado. Está claro que la absorción no juega aquí un papel esencial.

Las ventajas potenciales de los hologramas volumétricos y, en particular, la posibilidad de concentrar gran cantidad de información en elementos de pequeñas dimensiones, estimulan los esfuerzos con el fin de crear nuevas emulsiones fotográficas especiales y buscar nuevos procesos

que permitan fijar la información contenida en las ondas estacionarias.

Uno de estos procesos es la formación de centros coloreados en algunos cristales transparentes. Tales centros se forman en los cristales bajo la influencia de los electrones o fotones, que poseen energía bastante grande. La probabilidad de formarse centros coloreados con energía fijada de la radiación excitatriz es proporcional a la densidad de la energía de radiación. En el caso de las ondas estacionarias, es mayor en los vientres y menor en los nudos. Por eso la intensidad de coloración, igual que la intensidad de ennegrecimiento de la emulsión fotográfica, resultan proporcionales a la intensidad de la onda estacionaria. La gran ventaja de ese método es la posibilidad de principio de borrar el holograma obtenido y de utilizar reiteradamente el cristal. En algunos cristales esto se logra mediante un simple calentamiento. Desafortunadamente, tales cristales no encontraron aún aplicación en la holografía práctica.

A la profundidad de la materia

La holografía moderna, basada en el empleo de los láseres, que por su coherencia superan inmensamente a todas las demás fuentes de luz, apenas cuenta con unos diez años. ¿Qué es lo que ya puede hacer y qué promete en el futuro?

La holografía puede competir exitosamente, aunque parezca sorprendente, con la fotografía corriente que usa objetivos, incluso en su rama cumbre: la obtención de imágenes planas en negro y blanco. Las posibilidades de la fotografía corriente se limitan en dos sentidos. El poder resolutivo, es decir, la capacidad de reproducir

por separado dos pequeños detalles de la imagen, es limitado por la calidad del objetivo y la calidad de la emulsión fotográfica. En el mejor de los casos, la imagen puede contener detalles con dimensiones de cerca de una centésima de milímetro. A veces es importante también la capacidad de la emulsión para reproducir la gradación del brillo del objeto. El mejor material fotográfico permite reproducir no más de cien grados entre el sector más blanco y el más oscuro de la imagen.

El poder resolutivo del holograma depende, principalmente, de su tamaño que, a su vez, puede ser limitado por las propiedades de la fuente de luz. No obstante, en la actualidad el límite del poder resolutivo del holograma no se determina con esto, sino con las propiedades de las emulsiones fotográficas, en las cuales se fijan los hologramas. Ya existen emulsiones fotográficas con poder resolutivo de hasta diez mil líneas en un milímetro. Su sensibilidad es muy baja, y por lo tanto la duración admisible de la exposición puede alcanzarse solamente mediante el empleo de láseres.

Para muchas aplicaciones es extraordinariamente importante que durante la impresión holográfica cada punto del holograma reciba información simultánea acerca de todos los puntos del objeto. Después, durante la restitución de la imagen, cada punto del holograma participa en la formación de cada punto de la imagen, por consiguiente, cualquier punto de la imagen se sintetiza por medio de todo el holograma. Precisamente gracias a ello, la holografía puede realizar un poder resolutivo récord y dar una gradación tonal cien veces más detallada que lo que pudiera ser para dos puntos vecinos de la

emulsión fotográfica. Desde luego, para valerse de toda la riqueza de los semitonos impresionados en el holograma, no merece la pena ni siquiera intentar de reproducir la imagen en el papel fotográfico. Nosotros sabemos ya que este papel no es capaz de hacerlo y perderíamos todo lo que hemos ganado. Desafortunadamente, en lo sucesivo, hasta que no se elabore un nuevo material fotográfico, la riqueza que suponen los semitonos impresos en el holograma, es posible de realizar únicamente para fines científicos, cuando la imagen se investigue con los fotorreceptores correspondientes.

Cuanto menor sea el trozo de holograma que hay que utilizar para la reconstitución de la imagen, tanto más pobre será la gama de los brillos y tanto menor, el poder resolutivo. No obstante, incluso una parte muy pequeña del holograma es capaz de formar la imagen del objeto completo, aunque dichas imágenes contienen cada vez menos detalles y se hacen cada vez más monótonas a medida que se reduzca la superficie del holograma utilizado.

Es natural considerar que los más próximos a la fotografía son el cine y la televisión e intentar aplicar a ellos los métodos de la holografía. El cine holográfico ya existe, aunque se está utilizando, por ahora, sólo en trabajos de investigación. La poca duración de los destellos de los láseres que dan impulsos gigantes — unas cienmillonésimas de segundo — permite fijar la distribución instantánea y el movimiento de los granos de polvo, las gotas de lluvia y de niebla en el aire, las partículas sólidas en el chorro de gas de los motores cohetes, las burbujas y los pequeños organismos en los torrentes de agua. Rodando los cuadros del holograma a ritmo lento

o deteniéndolos incluso, se puede estudiar bien la distribución volumétrica de los detalles más importantes, efectuar mediciones precisas u otras observaciones inaccesibles en los procesos naturales rápidos.

La vía hacia la creación de películas holográficas de argumento experimenta dificultades puramente técnicas, relacionadas con la necesidad de utilizar láseres superradiantes y de crear películas cinematográficas especiales. La superación de estas dificultades es cuestión de tiempo.

La información tan voluminosa registrada en el holograma dificulta mucho su transmisión por el canal de televisión. Los cálculos demuestran que para eso hay que aumentar centenas de veces la banda del canal de televisión, lo cual será posible únicamente cuando la televisión pase, por lo menos, a la gama de ondas hertzianas milimétricas. Mas también en este caso es menester reducir radicalmente el diámetro del haz electrónico en los tubos de televisión, tanto receptores como transmisores, y perfeccionar el recubrimiento de la pantalla del tubo.

No obstante, ya los experimentos realizados en el extranjero respecto a la transmisión de una imagen holográfica inmóvil demostraron la excepcional estabilidad contra las interferencias del sistema. La imagen se reproducía con distorsiones mínimas, incluso cuando la comunicación no se interrumpía por las interferencias durante nada más que el 10 por ciento del tiempo total de transmisión.

Los primeros pasos de la holografía estaban relacionados con el microscopio. La microscopía electrónica había alcanzado gran perfección sin aplicar la holografía. Esto, en parte, privaba a la holografía de uno de los estímulos de desa-

rrollo en los primeros años de su existencia. No obstante, la posibilidad de realizar imágenes volumétricas hizo que la holografía a base de emisión láser participara nuevamente en la resolución de los problemas de la microscopia electrónica.

Por lo visto, las mayores perspectivas del microscopio holográfico existen en la rama de los rayos ultravioletas y los rayos X, donde no es posible utilizar la técnica de lentes. Pues la mayoría de los materiales son opacos a los rayos ultravioletas cortos y, prácticamente, no distorsionan la trayectoria de propagación de los rayos X. Mas, por ahora, no existen láseres a base de rayos X. Tampoco hay láseres lo suficientemente potentes en la gama de los rayos ultravioletas cortos. Por eso la realización de las ventajas potenciales del microscopio holográfico es el problema del futuro.

Donde mayor aplicación práctica adquirió la holografía fue en la técnica y en los trabajos de investigación. Por ejemplo, en la fabricación de piezas de alta precisión de configuración compleja — paletas de turbina, hélices de buque, etc. —, donde el control de la pieza ocupa gran parte del tiempo, requiere dispositivos complejos y alta calificación. Si dejamos que la luz de láser, reflejada del objeto, pase a través del holograma obtenido por medio del calibre, resultará que la divergencia en las dimensiones de la pieza que constituye nada más que una fracción de la longitud de onda, con respecto a las dimensiones del calibre, origina la aparición de franjas de interferencia en la pantalla. El número y la disposición de estas franjas caracterizan la divergencia que existe entre las dimensiones de la pieza y la magnitud calculada. Sobre

todo es muy cómodo poder efectuar el control visual ininterrumpido en el proceso del acabado final de las dimensiones de la pieza. No es necesario que la superficie de la pieza esté pulida, como en los métodos anteriores de control óptico.

En muchos casos no hay ni necesidad de preparar el calibre. El holograma se puede hacer simplemente por el dibujo de la pieza e, incluso, basándose en una fórmula matemática que describa la forma de la superficie de la pieza.

Dejando pasar la luz de láser, que se dispersa por cualquier pieza de la máquina en funcionamiento, a través del holograma de la pieza inmóvil podemos ver las vibraciones y las pequeñísimas deformaciones de la pieza. Además, no hay necesidad de actuar con algo sobre ésta, excepto con luz.

Los métodos holográficos se utilizan ya, y con éxito, en la audiovisión y la radiolocalización. Si un objeto sumergido en un líquido transparente lo irradiamos con un flujo de ondas sonoras o ultrasonoras, de modo que las ondas dispersas por él caigan sobre la superficie del líquido, tendremos que en este líquido se formarán cabrillas. Si, además, en la superficie cae al mismo tiempo la onda que va directamente de la fuente, las cabrillas en la superficie se transformarán en un sistema de ondas estacionarias inmóviles, que contienen información acerca de la forma del objeto y de las propiedades mecánicas de su superficie. Al irradiar dichas ondas estacionarias con luz de láser, se puede ver a simple vista la imagen del objeto oculto en el líquido. De manera análoga pueden investigarse los rechupes y otras inclusiones en el interior de los bloques de metal o de cemento, así como en otros cuerpos sólidos opacos.

Los radares más difundidos tientan el espacio con un estrecho haz de ondas hertzianas. La imagen del objetivo sobre el fondo circundante se reproduce en el tubo del radar por puntos, análogamente a como se reproduce la imagen en el televisor.

En el último tiempo, la misión planteada ante la radiolocalización se hace más compleja. Hay que efectuar el seguimiento simultáneo de muchos objetivos que se desplazan rápidamente por grandes zonas del espacio. El radar habitual de una sola antena alcanzó los límites de sus posibilidades. Aparecieron sistemas complejos con muchos elementos; aumentó extraordinariamente el volumen de información a ingresar. Mas los métodos de holografía también aquí permiten lograr buenos resultados.

La holografía proporciona posibilidades inagotables en el campo de las computadoras y en otros sistemas de acumulación y elaboración de la información. Los cálculos demuestran que el holograma plano en una placa de siete por siete centímetros puede contener 100 millones de unidades de información, lo que equivale a una biblioteca de 300 libros, con 200 páginas cada uno.

El holograma volumétrico puede concentrar un millón de millones de unidades de información en un centímetro cúbico. La tarea consiste en poder realizar este registro de manera rápida y cómoda. Además, y esto es más complicado aún, hay que saber extraer rápidamente de esta masa la información necesaria.

La enorme ventaja que posee el registro holográfico es que puede sustituirse la búsqueda

sucesiva aplicada en otros sistemas (el trashojeo de las páginas, la revisión de los índices y de las tarjetas bibliográficas, el escuchar las cintas magnéticas), por el análisis simultáneo de todo el bloque de la memoria.

Por ejemplo, el método que a veces se llama método de imágenes fantasmales, se aplica del modo siguiente. Por ejemplo, la información contenida en una página del libro se introduce sucesivamente en el holograma: el bloque de memoria. En este caso, una parte de cada página está destinada al registro de los datos claves, tales como el título del libro, el autor, el número de la página. En la fase de reconstitución de la imagen, el rayo láser, dirigido hacia el holograma, pasa previamente a través de la tarjeta clave: una lámina a la que están aplicados los datos clave de la página necesaria. En la pantalla surge inmediatamente la imagen de toda la página. La técnica existente permite restablecer con bastante precisión el contenido de la página, incluso si sólo el dos o el tres por ciento de su superficie se utiliza en calidad de clave de la búsqueda. Esto, desde luego, simplifica considerablemente el proceso. Pero los científicos quieren lograr una compresión de información mucho mayor.

Más eficaz es el método análogo a la memoria asociativa. El gran volumen de los sistemas holográficos de memoria, junto con la aplicación de la metodología asociativa, permitirá crear en el futuro una máquina para las traducciones, que almacene en el "diccionario" no palabras sueltas, sino frases enteras. En el bloque se imprime la información acerca de la relación que tiene la señal de entrada (por ejemplo, una frase determinada de la lengua rusa) con la señal de

salida (la frase correspondiente de la lengua extranjera). En el bloque de salida se escriben solamente los datos de salida, que en nuestro ejemplo son muchísimas frases en una lengua extranjera. En la fase de recuperación de información, el bloque de salida se ilumina con un rayo láser que pasa a través del bloque de la memoria. Cuando está ausente la señal de entrada, en la pantalla, detrás del bloque de salida, habrá sólo una iluminación uniforme débil. En cambio, si además del haz de referencia, sobre el bloque de memoria cae la segunda parte del rayo del mismo láser, parte que previamente habíamos dejado pasar a través de la película en la que estaba escrita la frase en ruso, resulta que en la pantalla aparecerá inmediatamente su equivalente en la lengua extranjera. Si nosotros no hemos introducido inicialmente en el sistema la frase correspondiente en lengua rusa y su equivalente en lengua extranjera, en la pantalla no surgirá ninguna imagen.

Por el momento, no existe tal máquina, mas su creación sólo requiere la superación de algunas dificultades técnicas. En una máquina como esa podrán efectuarse traducciones aproximadas de frases que le interesen al abonado, incluso si estas frases no habían sido introducidas antes en la memoria.

Los métodos que acabamos de describir, aunque en forma muy abreviada, no sólo permiten efectuar la búsqueda rápida, sino también la elaboración de la información; por ejemplo, efectuar operaciones matemáticas y lógicas o identificar distintas imágenes: hallar fotografías en las que está representada una persona determinada, realizar el análisis de la sangre o de las huellas digitales, y muchas otras cosas.

En el último tiempo se han elaborado métodos específicos de holografía que permiten pasar sin ayuda de fuentes de radiación coherente. Estos representan, en cierto sentido, un retorno a las fotografías de Lippmann, pero en grado más alto y sin el empleo de lentes. En el método de Lippman, la estructura interferencial surgía durante la interacción de la luz incoherente que pasaba a través del objeto, con los rayos de la misma luz reflejados del espejo adyacente a la emulsión fotográfica. En la holografía incoherente moderna, la emisión incoherente, que había traspasado el objeto, se desdobla con una red de difracción. Dos haces principales, formados por esta red, son dirigidos hacia el holograma con la ayuda de dos espejos auxiliares. Este método es también aplicable a los rayos X o, incluso, a los rayos gamma en el efecto de Mössbauer.

La holografía moderna es la hija del láser, que habiendo salido de los pañales se convirtió en un medio para el progreso rápido de la ciencia y la técnica. Nosotros seríamos testigos de muchas maravillas que la holografía volvió realidad.

Nosotros lo veremos

En marzo de 1971 me conocí con Denisiuk cuando éste asistía, por primera vez, a la reunión de la Academia de Ciencias después de ser elegido miembro correspondiente.

— En nuestros días, hay muchos que dan demasiada importancia a las cuestiones de la prioridad — dijo Denisiuk —. Desde luego, Gabor fue el primero que inventó la holografía y demostró la posibilidad de llevarla a la práctica.

No obstante, me alegro de haberme enterado de sus trabajos cuando yo mismo había formulado ya mi método y obtenido sus resultados. ¿Quién sabe si yo fuera por el camino tradicional, empezando por el estudio de la literatura, posiblemente me hubiesen cautivado las ideas de Gabor, y entonces no hubiese podido llegar a la idea de la holografía volumétrica?

Pues nuestros enfoques eran muy semejantes e idénticos los objetivos — continuó Denisiuk —, y es que luego de aparecer en la revista la resolución hecha, uno puede desanimarse involuntariamente. Si yo hubiese leído los artículos de Gabor un año o dos antes, es posible que la holografía volumétrica la hubiese inventado otro individuo y también pudiera ser que esto ocurriese mucho más tarde. Por lo que yo sé, Gabor comprende perfectamente la diferencia que existe entre nuestras direcciones y siempre hace referencia a mis trabajos en la holografía volumétrica. Y yo, desde luego, reconozco su prioridad y sus méritos, así como los méritos de Leith en la creación de la holografía plana, obtenida mediante el láser...

Por lo demás, en lo que atañe a las cuestiones de historia, no debemos olvidar que tanto Denisiuk como Gabor tenían antecesores. Gabor señala que su método surgió como una modificación de las ideas de W. Bragg, el mayor especialista en el análisis roentgenoestructural.

Mas ni Gabor, ni Denisiuk sabían nada acerca de la labor del físico polaco M. Wolfke quien había formulado el principio de la reconstitución en dos etapas de la imagen del objeto, durante lo cual se utilizaba el cuadro difraccional formado por este objeto. M. Wolfke igual que Gabor, formuló su idea con arreglo a los rayos X

y la comprobó con un experimento en luz visible. Las publicaciones correspondientes aparecieron en 1920 y se basaban en los trabajos teóricos del autor, realizados entre los años de 1911 y 1914. Además, estas investigaciones se apoyaban en las obras y en la teoría del microscopio de Ernst Abbe, famoso especialista en óptica, de la ciudad de Jena. M. Wolfke señala que en 1913, también E. Hupka se acercó a la idea de la reconstitución de la imagen. Desconociendo a sus antecesores, semejante idea fue expuesta por H. Bersch en 1938.

Todos ellos eran pioneros, que habían adelantado mucho las posibilidades e, incluso, las necesidades de su tiempo.

A mí no sólo me interesaba la cuestión de la prioridad.

— Dicen que la holografía es la hija del láser. ¿Es correcto eso? Pues usted, igual que Gabor, obtuvo sus hologramas antes de aparecer los primeros láseres — le pregunté yo.

— A pesar de todo, eso es cierto — respondió Denisiuk —. Sin los láseres, la holografía seguiría siendo un principio interesante que, posiblemente, tuviera una aplicación limitada en ciertas investigaciones especiales. Los láseres inspiraron a la holografía una vida nueva. Le abrieron numerosas vías en la práctica. Llamaron la atención de los científicos e ingenieros, así como de los lectores a esta rama de la ciencia. Para mí, la holografía no sólo es una rama de la ciencia, sino que es también una base para reflexionar. Juzgue usted mismo: la tendencia a grabar el mundo circundante es una de las manifestaciones más características del intelecto. A veces, el mono utiliza un palo: el instrumento más simple. Pero únicamente el hombre apren-

dió a dibujar. El hombre contemporáneo cree que la pintura está alejada de la práctica, interviniendo solamente como un valor estético. Mas en la antigüedad, la gente identificaba la imagen con el objeto. Los dibujos tenían sentido mágico. El dibujo y la pintura eran el primer método de descripción y, en parte, servían para el conocimiento del mundo circundante. A este método le falta la precisión propia de las matemáticas, en cambio él está fuera de la competencia en cuanto a la influencia directa que ejerce sobre nuestros sentidos y nuestros pensamientos. Nosotros no sabemos cómo el cerebro reconoce las imágenes, pero ni la máquina electrónica más perfecta no puede, por el momento, ni siquiera en el mínimo grado, compararse en cuanto a esto al cerebro. No cabe duda que fueron los dibujos, precisamente, los que transformándose poco a poco en escritura pictográfica, más tarde se convirtieran en jeroglíficos y, por fin, en letras de los alfabetos modernos. Desde luego, la holografía no podrá sustituir a la escritura. Pero ésa permitirá que se logren inscripciones compactas de grandes cantidades de información... Existe otra rama muy interesante, que es contigua a la holografía. Algunos fisiólogos suponen que el proceso de formación de imágenes en la corteza cerebral se asemeja algo a la formación del holograma. Efectivamente, el cerebro es muy estable contra las lesiones. Se crea la impresión de que la rememoración de la imagen en el cerebro no se produce de manera local, ni en células determinadas, sino de modo global: de que en estos procesos participan simultáneamente todas o la mayoría de las neuronas. Y, al seccionar las distintas zonas de la corteza cerebral, nosotros no destruimos totalmente una parte de lo re-

cordado, sino que reducimos la cantidad de detalles. Pues también en el trozo más diminuto de holograma se conserva la imagen de todo el objeto, pero cuanto menor sea el trozo de holograma que queda, menos detallada será la reproducción del objeto. Desde luego, la analogía no significa identidad. Pero indudablemente que el investigador obtendrá una parte de la realidad.

— Yuri Nikoláevich — le dije yo —, es sabido que los animales no perciben la fotografía. El perro reconoce la voz de su amo, grabada en el magnetófono, mas no reacciona ante su retrato. ¿Cuál es su comportamiento ante la imagen holográfica?

— No sé si alguien ha realizado semejante experimento, mas no dudo de que el perro reconocerá a su dueño por el holograma. La fotografía es convencional en gran parte. Para su percepción, es necesario un nivel determinado de intelecto, es menester el entrenamiento. Y el holograma da una imagen completa y objetiva del objeto. Soluciona, incluso, hasta el problema más complejo de discernimiento automático de las imágenes. Hoy podemos ya obtener retratos holográficos de personas mediante el impulso del láser. Queda por efectuar el experimento que le interesa a usted... Yo creo — señaló Denisiuk en la conclusión — que es más difícil crear el cine y la televisión holográficos y volumétricos, que solucionar muchos problemas puramente técnicos. Mas nosotros tendremos tiempo aún de ver lo uno y lo otro.

CAPITULO VI

CUASIOPTICA

Los dominios de la cuasióptica

La cuasióptica es la óptica a la que resultaron insuficientes sus dominios tradicionales — las zonas de la luz visible — y ella se le agregó así todo lo demás, incluso las zonas de las ondas hertzianas centimétricas. Mas, habiéndose demostrado tan agresiva con relación a sus vecinos, la cuasióptica no extiende sus ambiciones por toda la construcción de muchos pisos, erigida sobre los cimientos echados por Descartes, Newton, Huygens y Fresnel. A ella no le interesa la naturaleza de los espectros, ni el análisis espectral, ni los procesos de absorción y dispersión, ni las complejas relaciones que existen entre la óptica y otras ramas de la ciencia.

La cuasióptica se planteó un problema que parecía insoluble, el de reconciliar dos antípodas que siempre están enemistados: la óptica de ondas y la de rayos, la óptica ondulatoria y la óptica geométrica. Por lo demás, podemos aceptar también el punto de vista opuesto: la cuasióptica apareció como resultado de la unión de la óptica geométrica con la ondulatoria.

Por su calificativo, la óptica geométrica expresa la formidable capacidad de las matemáticas (la geometría, en particular) de expresar las regularidades de los fenómenos, abstrayéndose de su esencia física concreta.

Euclides, el gran geómetra de la antigüedad, podía utilizar la ley de reflexión de la luz sin conocer nada acerca de la naturaleza de la

luz. Veía luz y sombras; sabía que el agujoro en la contraventana separaba un rayo de entre toda la masa de luz. Podía convencerse de que el rayo se refleja de una placa metálica o de la superficie del agua, y que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia. Esto bastó para siglos.

Al cabo de 1500 años, Descartes y Snell descubrieron la ley de refracción de la luz. La cuestión de por qué la luz se refracta así, y no de otro modo, preocupaba a los físicos más destacados. Newton discutía porfiadamente con Hooke y con Huygens; mucho más tarde, Biot discutía con Fresnel, y Lorentz con Maxwell...

Mas esto no conmovía a los matemáticos. Ellos tenían en su poder dos leyes. Ahora, la cosa de por qué eran así y en qué estaban basadas no tenía importancia para los matemáticos. Lo principal era que la ley de reflexión y la ley de refracción reflejasen las propiedades de la naturaleza y describiesen exactamente cierta zona de interacciones entre la luz y la sustancia. Partiendo de estas leyes los matemáticos pueden y deben construir métodos que permitan extraer todos los corolarios que de éstas se deducen, hacer cálculos para las lentes de las gafas y telescopios, construir microscopios y linternas mágicas.

Los eminentes matemáticos, tales como Hamilton, Gauss y muchos otros, hicieron su aportación a la creación y desarrollo de la óptica geométrica. En nuestro siglo, el siglo de la profesión muy especializada, aparecieron especialistas en cálculo de aparatos ópticos, siendo la geometría óptica su instrumento principal. En realidad, estos especialistas son matemáticos. De toda la física restante, ellos utilizan solamente la ley de dispersión, que describe la varia-

ción del índice de refracción en función de la frecuencia. Sin interesarles por qué existe tal relación. Así es la naturaleza, razonan ellos, ocupándose de su trabajo, y lo tienen en cuenta cuando seleccionan los vidrios de distintas clases.

Desde luego, después de triunfar la teoría ondulatoria de Fresnel, ningún hombre instruido fue capaz de arriesgarse a desmentirla. Además los admiradores de la óptica geométrica ni siquiera intentaron describir con sus métodos todos aquellos fenómenos que surgían durante la interacción de dos rayos de luz, o la capacidad de la luz de contornear un obstáculo. Es más, los diseñadores que terminan los cálculos del telescopio o el microscopio tienen que valerse de la teoría ondulatoria para evaluar el poder de resolución de su instrumento. Pues ellos saben que es precisamente el fenómeno de difracción el que limita el tamaño de los más diminutos detalles que pueden ser distinguidos con ayuda del microscopio, o determina las condiciones, en las cuales un telescopio grande descubre dos estrellas cercanas allí donde uno pequeño las representa como un solo punto luminoso.

El amanecer

Al mirar hacia atrás desde la altura de la ciencia actual, podemos así revelar los antiguos orígenes de la unión entre la óptica geométrica y la ondulatoria y referir el nacimiento de la cuasióptica a la primera mitad del siglo pasado.

Es más, en la aurora de la óptica ondulatoria, el gran Huygens, sin tener aún noción de la luz como ondas periódicas, dibujó el cuadro de los frentes ondulatorios y, de este modo, no

sólo obtuvo las leyes de reflexión y refracción, sino que construía también la forma de las superficies de los espejos y de las lentes, utilizando para esto el compás y la regla. Por lo tanto, la óptica de Huygens debería llamarse "óptica geométrica" y no ondulatoria. Pero la costumbre es más fuerte que la lógica.

Toda la grandeza de Huygens, que reunía en su persona el vigor de teórico y la ambición de obtener inmediatamente resultados prácticos, se ve del fragmento siguiente que da comienzo al sexto capítulo de su "Traité de la lumière".

"Después de haber explicado cómo de nuestras suposiciones sobre la naturaleza de la luz se derivan las propiedades de la reflexión y la refracción de los cuerpos transparentes y opacos, daré aquí un método muy simple y natural que permite deducir, de estos mismos principios, las formas correctas para los cuerpos que mediante la reflexión o refracción reúnen o, según el deseo, dispersan los rayos de luz. Verdad es que todavía no veo que sean aplicables estas formas para efectuar la refracción, debido, por una parte, a las dificultades que existen para dar a los cristales de los anteojos la forma necesaria y con la precisión requerida; por otra parte, porque la propia refracción contiene una propiedad, la cual, como lo había demostrado bien Newton con experimentos, presenta obstáculos a la intachable unión de los rayos. De todos los modos, voy a exponer la investigación de estas formas, ya que, por decirlo así, ella misma se impone y en vista de que la consonancia que se manifiesta aquí entre el rayo refractado y el reflejado, confirma una vez más nuestra teoría de refracción. Además, es posible que para ellos, en el futuro,

se descubran aplicaciones útiles, que aún se desconocen".

A continuación, Huygens, valiéndose de construcciones simples, halla la forma del espejo enfocador — la parábola —, y obtiene las principales propiedades de las lentes, incluyendo aquellas que Descartes había establecido anteriormente.

El citado fragmento contiene dos ideas características para la mentalidad del autor. El comprendía que la precisión de sus construcciones geométricas estaba por encima de las posibilidades prácticas de aquellos tiempos. Por lo demás, alcanzó una alta perfección en el pulido de cristales y construyó, con sus propias manos, telescopios que para sus tiempos estaban de tamaño muy grande.

La segunda observación se refiere a Newton y a sus experimentos relacionados con la dispersión. Huygens aceptó sin reservas la conclusión errónea de Newton de que la dispersión de la luz "obstaculiza la unión totalmente correcta de los rayos".

Es de señalar que el error de Huygens y de Newton se mantuvo en la ciencia durante muchos años, hasta que el modesto óptico Dollond no eliminó el obstáculo que les parecía infranqueable. Como resultado de los trabajos que realizó durante muchos años, logró alcanzar el objetivo. Después de combinar una lente de crown-glass con otro de flint-glass, obtuvo una imagen que no se deterioraba con los colores irisados, que en lentes habituales emborronan los límites de la imagen. Dollond halló la forma de las superficies, en las que las distorsiones, introducidas por ambas lentes, son inversas y se compensan bien una a la otra.

La teoría ondulatoria de la luz puede, en principio, realizar cálculos para cualquier instrumento óptico. No obstante, en muchos casos los cálculos necesarios resultan demasiado complicados y voluminosos. La potente óptica ondulatoria requiere grandes esfuerzos del científico allí donde la óptica geométrica primitiva indica un camino simple y corto.

Los matemáticos no podían dejar sin atención esta situación extraña. Lograron esclarecer ese problema. Resulta que en los casos en que las dimensiones de los instrumentos ópticos — de las lentes o espejos, de los prismas o diafragmas — y las distancias entre éstos son mucho mayores que la longitud de ondas de luz, las leyes de la óptica geométrica es un simple corolario matemático de la naturaleza ondulatoria de la luz. Sólo los problemas más complejos, de los que tratamos ya anteriormente — la cuestión sobre la distancia mínima en la que las imágenes de dos puntos cercanos no se fusionan en uno solo, y algunas otras — requieren la realización de cálculos precisos sobre la base de la teoría ondulatoria.

Desde entonces, en la ciencia y la técnica, en la óptica y en sus numerosas aplicaciones apareció una frontera bien clara. A un lado se encuentran los problemas accesibles a la óptica geométrica, cuya solución por medio de los métodos ondulatorios es tan absurda como la versificación de un libro de cocina. Al otro lado se encuentran problemas más complejos, que exigen la aplicación de todo el arsenal de la óptica moderna. Cualquier intento de los eruditos a la violeta de trasladar los métodos de la óptica geométrica al otro lado de esa frontera, al campo donde no pueden menospreciarse las propiedades

ondulatorias de la luz, conduce a disparatos y a paradojas aparentes, con las cuales a los jóvenes maestros les gusta desconcortar a las jóvenes estudiantas. Existe, no obstante, la zona limítrofe a la frontera, en la que penotran con grandes dificultados los extremistas. Esta es la zona del compromiso, de la que trataromos más tarde.

Cerca del límite

Las ondas radioeléctricas o hertzianas tienen, en comparación con las ópticas, una longitud enorme. Si nos apartamos de las comparaciones, tenemos quo reconocer que la longitud de ondas utilizables en la radiotécnica moderna ostá comprendida entre límites extraordinariamente amplios. En los sistemas de radionavegación y en la transmisión de señales de la hora exacta se utilizan a veces ondas hertzianas que tienen decenas de kilómetros de longitud. En nuestros días, las estaciones de radiodifusión no utilizan ondas cuya longitud supera dos kilómetros ni es menor de diez metros. Dentro de estos límites, quedan libros únicamente algunos sectores destinados para las necesidades técnicas: para las señalos de los buques que naufragan, para los sistemas de comunicación y para los radioastrónomos. La televisión y la radiodifusión musical de alta calidad se introdujoron en las gamas de ondas métricas y decimétricas.

Hoy día es tanta la estrechez en el éter, que hubo necesidad de acuerdos internacionales para poder realizar una distribución en cierto grado admisible de ondas hertzianas deficitarias.

Las ondas radioeléctricas tradicionales superan muchísimo, por su longitud, las dimensiones de las piezas de los equipos. Estas ondas

son conmensurables solamente con las piezas más grandes, las antenas. No es de extrañar que en los cálculos de equipos, a los ingenieros de radio durante mucho tiempo les satisficieran los métodos puramente electrotécnicos y que en el diseño de las antenas consideraran el fenómeno de difracción.

A veces, y sobre todo al operar con ondas cortas, a la radiorrecepción le estorba la interferencia. Así surge el desvanecimiento (fading) de recepción como resultado de la superposición de varias ondas hertzianas que llegan al receptor por distintas vías.

La radiolocalización ha monopolizado casi totalmente las ondas centimétricas y milimétricas. Sin embargo, en su dominio penetran poco a poco los novísimos sistemas de la comunicación pluricanálica.

Las ondas hertzianas centimétricas son hasta tal punto más cortas que la distancia entre el receptor y el transmisor, o entre el radar y el objetivo, que surgió involuntariamente la tentación de aplicar aquí las leyes de la óptica geométrica. No obstante, la sección transversal de los tubos metálicos — los guíaondas — o, incluso, las dimensiones de las antenas en esta banda siguen siendo aún conmensurables, de todos modos, con la longitud de onda, y la naturaleza ondulatoria se manifiesta con plenitud. Sólo estimaciones más simples pueden realizarse aquí a base del enfoque geométrico.

Pero el paso a las ondas milimétricas y submilimétricas condujo a un cambio brusco. Las dificultades en la fabricación de los guíaondas con pequeña sección y la gran absorción de energía de ondas hertzianas en sus paredes, han obligado a los ingenieros a utilizar guíaondas con

sección grande, cuyas dimensiones transversales constituyen muchas longitudes de ondas hertzianas, que se transmiten por éstos. Se han visto obligados a recurrir a los espejos, lentes, diafragmas y prismas, que hasta entonces habían sido patrimonio de la óptica.

Los radioingenieros y radiofísicos, acostumbrados a emplear la teoría ondulatoria y los métodos ondulatorios de cálculo, chocaron con las mismas dificultades que en su tiempo surgieran ante los apóstoles de la teoría ondulatoria y más tarde obstruyeran el camino a sus adeptos, cuando éstos intentaron imponer los métodos de la óptica ondulatoria a los diseñadores de instrumentos ópticos. Los cálculos se tornaban demasiado voluminosos. Mas tampoco era posible utilizar los métodos de la óptica geométrica. Estos conducían a errores intolerables, pues los fenómenos de difracción y de interferencia jugaban aquí un papel muy importante.

Así surgieron los métodos cuasiópticos de cálculo, métodos adaptados a que al calcular la acción de tales piezas ópticas prístinas, como son el espejo y la lente, a la vez se tenga en cuenta la influencia que ejerce la difracción sobre sus bordes. Con este fin, los teóricos utilizaron todo el arsenal de ecuaciones de la óptica ondulatoria, modificándolo mediante la aplicación de métodos que los matemáticos denominan asintóticos.

Esta es una de las vías más potentes para obtener fórmulas de cálculo aproximativas, basadas en la consideración conveniente de ciertas características de escala del problema. En el caso dado, tal característica es la relación entre las dimensiones del equipo y la longitud de onda.

Por lo demás, no menos justa sería la vía de generalización de los métodos de la óptica geométrica. Semejantes intentos ya se han hecho y, sin duda alguna, seguirán haciéndose en el futuro. Su éxito permitiría encontrar una nueva aplicación al enorme arsenal de la óptica geométrica.

Así pues, los especialistas en radio crearon para sus necesidades unas lentes hechas de sustancias que no dejan pasar la luz, espejos cubiertos con laca negra para proteger sus superficies de la corrosión y otras piezas análogas. Piezas ópticas, que al mismo tiempo no son ópticas. Los especialistas en radio las llamaron cuasiópticas, o sea, casi ópticas. Así fue cómo aparecieron los métodos cuasiópticos, adaptados para solucionar problemas que surgían en el límite de las zonas y no querían someterse a la óptica geométrica ni a la ondulatoria, donde la primera conduce a errores intolerables y la segunda requiere cálculos demasiado voluminosos.

Los láseres

Cuando surgían los láseres, T. Maiman y A. Javan, sin vacilar, utilizaron en sus trabajos, sin precedentes, los espejos planos. Sólo tenían que prepararlos con más esmero que como se efectuaba antes. No hacían absolutamente ningunos cálculos, pues confiaban en la autoridad de Townes (es posible que hayan leído también los artículos de Prójorov). El resonador óptico, compuesto de dos espejos planos, era el método más simple para efectuar la reacción, sin la cual no puede funcionar el generador cuántico óptico. (Aquí hubo que rehusar el término "láser", puesto que tiene también un segundo significa-

do: amplificador cuántico óptico, aparato que no requiere, por lo general, el empleo del resonador óptico).

No obstante, a medida que se desarrollaban los láseres, el "método a la ventura", que así llaman a veces al enfoque puramente empírico, resultó insuficiente. Para poder comprender el proceso de trabajo del láser, fue necesario esclarecer las particularidades de los resonadores ópticos.

Y en seguida se supo que, pese a las dimensiones de los resonadores, en muchos órdenes superiores a la longitud de ondas luminosas, no eran aplicables los métodos de la óptica geométrica. Y los métodos de la óptica ondulatoria conducían a cálculos que podían efectuarse solamente con ayuda de computadoras.

Los investigadores norteamericanos A. Fox y T. Li fueron los primeros que comenzaron a investigar el resonador óptico. Ellos comprendían perfectamente que los cálculos del interferómetro óptico de Fabry y Perot, que en realidad no se diferenciaba del resonador del láser, aquí no servían. La cuestión consiste en que la aplicación del interferómetro de Fabry y Perot en la óptica clásica ha previsto su iluminación desde fuera con ondas luminosas, cuyos frentes planos inciden sobre el interferómetro paralelamente a sus espejos. En el interferómetro surge un sistema de ondas planas estacionarias. Además, en los interferómetros ópticos las dimensiones transversales de los espejos superan, generalmente, la distancia que hay entre ellos.

En el láser, la situación varía totalmente. La energía no ingresa de afuera en su resonador-interferómetro. Esta se libera dentro de él. Además, el proceso de autoexcitación del láser

consistió en que la onda débil, que surge en él fortuitamente, va amplificándose poco a poco dentro del resonador como resultado de los numerosos recorridos que hace de un espejo a otro, y viceversa. Y la distancia entre los espejos resulta mucho mayor que las dimensiones de los mismos.

Fox y Li se plantearon la tarea de observar el comportamiento de la onda luminosa que recorre reiteradamente el espacio entre los espejos. Para simplificar el problema, en esta fase no desearon examinar el propio elemento activo del láser, considerando que los espejos eran ideales, es decir, que reflejaban la luz sin pérdidas.

Es interesante señalar hasta qué punto el planteamiento del problema por Fox y Li coincide con el viejo enfoque de Huygens: el espacio entre los espejos lo recorre reiteradamente un impulso de luz; la esencia ondulatoria de la luz retrocede a segundo plano. Es natural que su cálculo esté basado en la formulación matemática más simple del principio de Huygens. A continuación, emplean la conocida integral de Fresnel y... llegan hasta complejas ecuaciones integrales. La solución de estas ecuaciones no se encuentra en ningún libro ni en ninguna revista de matemáticas.

Si Fox y Li vivieran en los tiempos de Fresnel, esto sería un callejón sin salida. Pero esto tuvo lugar en la sexta década de nuestro siglo y los científicos recurrieron a la ayuda de la computadora. A la máquina se le propuso unas cuantas variantes del problema: espejos planos en forma de discos esféricos o en forma de bandas estrechas, y espejos cóncavos con distinta distancia focal. La computadora IBM-704 iba examinando paso a paso cómo se deformaba la

onda a medida que aumentaba el número de pasadas, y demostró que la onda dejaba de modificarse, prácticamente después de efectuar varias centenas de estas pasadas.

A continuación, la computadora precisó que el resonador óptico separaba, de toda la diversidad imaginable de ondas, sólo un conjunto determinado, correspondiente a las frecuencias características para el resonador dado. La computadora dio su respuesta en forma de tablas y gráficos numéricos. Pero los científicos se conforman con estas respuestas por no tener otras más cómodas, que tuvieran el aspecto de las conocidas funciones matemáticas. Los hombres de ciencia se acostumbraron a las funciones como resultado del entrenamiento a lo largo de tres siglos, que fue transmitiéndose del profesor al alumno y de una generación a otra. No era de extrañar, pues, que ellos tratasen de hallar para este problema también una solución semejante.

Los primeros que hallaron tal solución para un caso particular fueron G. Boyd y J. Gordon. Ellos examinaron los espejos cóncavos, cuyos focos coincidían. En este caso, el principio de Huygens conducía a la ecuación integral cuya solución era conocida.

El enfoque oscilatorio

A la teoría de los resonadores láser hizo aportaciones esenciales el profesor Lev Albértovich Vainshtéin, en la actualidad miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS y uno de los mayores especialistas en la rama de la física matemática. Vainshtéin comenzó su labor científica bajo la dirección del académico

M. A. Leontóvich, quien le transmitió las tradiciones progresivas de la escuela de Mandelshtam y Papaleksi. En la formación del estilo científico del joven teórico tuvieron gran importancia los muchos años que él colaboró en el instituto fundado por el académico A. I. Berg, donde cobró interés por la solución de problemas concretos, que emanaban de las necesidades de la práctica. Trabajando en estrecho contacto con ingenieros y físicos-experimentadores, Vainshtéin procuró y aprendió a exponer sus resultados en forma accesible para los prácticos y cómoda para realizar cálculos concretos. Para el comienzo de la época del láser, Vainshtéin habíase destacado ya entre las filas de los principales especialistas en el campo de la teoría de guíaondas y resonadores y en la teoría de la electrodinámica de frecuencias superaltas. Muchos métodos cuasiópticos, destinados a la investigación en la gama de ondas hertzianas centimétricas y milimétricas, fueron creados por él u obtenidos sobre la base de sus resultados.

El trabajo que más tarde fuera el tema de la tesis de doctorado de Vainshtéin, constituyó toda una época en el campo de la teoría de los guíaondas. Fue el primero que solucionó el problema sobre la reflexión de la onda electromagnética desde el terminal abierto del guíaondas. En aquel tiempo, este problema parecía interesante solamente para un pequeño grupo de especialistas.

A principios de los años 50, a nosotros, entonces estudiantes de la facultad radiotécnica, los profesores nos decían que los guíaondas y los resonadores eran el principal logro de los años precedentes. Y eran pocos los egresados que se arriesgaban a elegir como tema de la tesis de

graduación el cálculo de estos complejos e insólitos conjuntos de los equipos de radio.

Las editoriales no se decidían a editar el trabajo de Vainshtéin, creyendo que no encontraría lectores y temiendo sufrir pérdidas. Sólo se arriesgó la Editorial *Soviétskoye Radio* ("La Radio Soviética"), fundada unos años antes por iniciativa de Berg. Esta editorial decidió editar la obra de Vainshtéin en tirada corta, mas el libro desapareció de las librerías en un abrir y cerrar de ojos.

La cosa, claro está, no consistía en la novedad del propio fenómeno.

El proceso de reflexión de la onda del terminal abierto del guíaondas no se diferencia, en principio, de la reflexión de la luz que sale de la pared de un acuario al aire. Tanto en un caso como en el otro lo importante es el cambio brusco de las propiedades del medio recorrido por la onda. Semejante proceso surge también durante el movimiento de las ondas sonoras por los tubos. El famoso Rayleigh lo estudió muy detalladamente, con arreglo a los tubos de los órganos. Pero su tarea era mucho más simple, pues el sonido son ondas de compresión y rarificación, son ondas longitudinales. Además, la longitud de ondas acústicas es mucho mayor que el diámetro de los tubos del órgano, en los cuales ellas se excitan. En cambio, las ondas hertzianas, igual que la luz y todas las demás ondas electromagnéticas, son transversales. Al estudiarlas, es menester tomar en consideración su polarización. Como resultado, al solucionar ese mismo problema, generalmente, hay que trabajar con el triple de ecuaciones.

Las dificultades eran mayores aún porque también la longitud de las ondas hertzianas, con

las que trataba Vainshtéin, era muy próxima a la anchura del guíaondas. Por lo tanto, él no podía menospreciar el papel que juega la difracción de las ondas hertzianas, al salir éstas del terminal del guíaondas. Para poder vencer todas las dificultades, se necesitaba un enfoque especial. Este enfoque lo elaboró precisamente Vainshtéin. Y la importancia del mismo salía muy fuera de los límites del problema concreto que trataba sobre el terminal abierto del guíaondas, para cuya resolución había sido creado.

Más tarde, Vainshtéin y sus colaboradores estudiaron muchísimos problemas complejos que surgían ante los experimentadores o que representaban la continuación lógica de sus trabajos anteriores. Naturalmente que para el comienzo de la era del láser estuvieron bien preparados para pasar de los problemos cuasiópticos de la radiotécnica a la investigación de problemas complejos que surgían en los resonadores ópticos, cuyas dimensiones eran inconmensurablemente mayores comparando con la longitud de ondas luminosas.

Vainshtéin los denominó resonadores abiertos, subrayando con ello que la diferencia principal no consiste en las dimensiones, sino en que el campo electromagnético de los resonadores se mantiene dentro, a pesar de que las paredes especulares constituyen sólo una pequeña parte de la superficie, dentro de la cual se encierra la energía del campo. La diferencia de principio resalta evidentemente a la vista del especialista en el ámbito de ondas centimétricas, que está acostumbrado a tratar con resonadores en forma de cavidades metálicas cerradas. Para comunicarse con el mundo exterior, en las paredes de las cavidades podían dejarse solamente pequeños

orificios o estrechas rendijas. De lo contrario, la calidad del resonador — su factor de mérito — empeoraba catastróficamente.

Por muy paradójico que sea, los resonadores abiertos no se comunican, ni mucho menos, con el mundo exterior a través de sus paredes abiertas, puesto que éstas constituyen un obstáculo infranqueable para las ondas electromagnéticas que se excitan en el resonador. Para comunicarse con el ambiente exterior, uno de los espejos se hace, por lo general, semitransparente, o se deja en él un pequeño orificio, igual que en la pared del resonador de cavidad metálico para gamas de ondas centimétricas.

La capacidad tan asombrosa que posee la frontera invisible — "imaginaria" — del resonador abierto para detener las ondas electromagnéticas es muy próxima a aquello que obliga a estas ondas a reflejarse del terminal abierto del guíaondas. La similitud es tan grande, que Vainshtéin pudo examinar bastante detalladamente las propiedades del resonador óptico, representando sus espejos como segmentos de las paredes de un guíaondas muy corto, privado del segundo par de paredes. Resultaba que existía toda una clase de ondas que, prácticamente, se reflejan por completo de los dos terminales de este asombroso guíaondas y que forman entre sus "paredes" — los espejos — un sistema de ondas estacionarias. Tales ondas estacionarias coinciden, en realidad, con las que había seleccionado la máquina electrónica IBM-704 al solucionar los problemas de Fox y Li.

Así es cómo la profunda intuición física y el enfoque "oscilatorio" general permitieron a Vainshtéin extender los métodos cuasiópticos de la electrodinámica de frecuencias extra-altas al

problema puramente óptico de la óptica del láser. No obstante, el ejemplo expuesto anteriormente es sólo uno de los muchos que existen. En un libro especial de Vainshtéin, titulado *Los resonadores abiertos y las líneas de transmisión*, se da una teoría general de los sistemas abiertos y se examinan muchas de sus aplicaciones prácticas.

Bajo la tierra

Las líneas de transmisión abiertas también llegaron a la óptica de la técnica de las ondas centimétricas. Las más conocidas son las líneas de radiorrelés que están compuestas de antenas especiales, instaladas en altos mástiles, que transmiten una a otra un estrecho haz de ondas hertzianas. Entre la emisora y el primer retransmisor puede haber hasta decenas de kilómetros. Por eso al retransmisor llega solamente una parte muy pequeña de energía transmitida. La antena de recepción del retransmisor transmite al amplificador la señal que ingresa, y la segunda antena, la emisora, la envía más allá. Así es cómo las señales de radio se propagan, haciendo pasos de gigante, a miles de kilómetros. A veces, por ejemplo, al cruzar una montaña, cuando es difícil efectuar el mantenimiento de los amplificadores y complicado su aseguramiento con energía eléctrica, se utilizan retransmisores pasivos. Estos son simplemente un par de espejos instalados de tal modo que las ondas hertzianas, que llegan al retransmisor, se reflejan por ellos en la dirección necesaria.

Las líneas de espejos fueron atentamente estudiadas en el Instituto de Radiotécnica y Electrónica de la Academia de Ciencias de la URSS,



bajo la dirección del profesor Boris Zajárovich Katsenelenbaum. Aquí se obtuvieron también importantes resultados en cuanto a la elaboración de líneas ópticas de comunicación a base de espejos. Estas líneas poseen una serie de ventajas en comparación con las hileras de lentes: líneas de comunicación a base de lentes, que están elaborándose con este fin en el extranjero.

Todas las dimensiones de las líneas ópticas de comunicación (las dimensiones transversales de los espejos o lentes, así como la distancia que mide entre ellos) son mucho mayores que la longitud de ondas luminosas. Aparentemente, esto es el reino eterno de la óptica geométrica. Desde luego, en rasgos generales, es así. Sin embargo, durante la utilización e investigación de estas líneas, el papel esencial lo desempeñan las pérdidas de energía transmitida, que surgen en los bordes de los espejos y lentes debido al fenómeno de difracción, lo cual es imposible calcular en los límites de la óptica geométrica. Pero la estricta teoría ondulatoria conduce en estos casos a ecuaciones tan complejas y voluminosas, que no es racional solucionarlas incluso con ayuda de computadoras. Aquí es más conveniente aplicar los métodos cuasiópticos que ligan los métodos de la óptica ondulatoria y la geométrica, permitiendo estudiar, de un modo bastante simple y preciso, los fenómenos de la difracción en haces ondulatorios largos.

Las líneas ópticas de comunicación se enfrentan con una dificultad que no juega papel esencial para las líneas de radiorrelés. Las ondas luminosas son absorbidas totalmente por la niebla, la lluvia y la nevada, que no influyen mucho en la propagación de las ondas hertzianas. Por eso para proteger las líneas ópticas de la influencia desfavorable de la intemperie, hay que encerrarlas en tubos, y para preservar estos tubos del deterioro, es necesario soterrarlos.

Como es natural, surge la siguiente pregunta: ¿por qué no utilizar en estas líneas ondas hertzianas centimétricas? La respuesta es sencilla. Para las ondas hertzianas es menester utilizar guíaondas: tubos metálicos con superficies interiores

elaboradas esmeradamente. En esta dirección se realizan trabajos, pero las dificultades son enormes. En el caso de las líneas ópticas, los tubos metálicos, prácticamente, no se necesitan. Estos pueden sustituirse por tubos de cemento, que son más baratos, o, incluso, por tubos de barro cocido, que tienen por misión tan sólo proteger los rayos de luz de la absorción en el vapor de agua y de la dispersión por las partículas de polvo, niebla, lluvia o nieve. En estas líneas, las ondas luminosas se transmiten de un espejo a otro y de una lente a otra. Los tubos no participan en el proceso de transmisión. Pues las "paredes abiertas" de la línea óptica de transmisión no permiten a las ondas luminosas que rocen las paredes de los tubos.

Las mayores dificultades con que se tropieza prácticamente durante la construcción de las líneas ópticas de comunicación surgen si hay necesidad de asegurar grandes precisiones. Pues, hablando en el lenguaje de la óptica geométrica, los rayos de luz tienen que estar dirigidos con gran precisión de un elemento de la línea a otro, de un espejo a otro, de una lente a otra. La sintonización inicial de la línea no es lo más complicado. Los ópticos e ingenieros cumplen esta tarea con bastante facilidad. Las dificultades surgen en el proceso de explotación, cuando la línea está ya debajo de tierra y es poco abordable para el personal de mantenimiento. Aquí viene en ayuda la automatización, que corrige la posición de distintos elementos en caso de que haya asientos de terreno o por motivo de otras causas.

La elección entre los espejos y las lentes, además, a favor de los espejos, se ha determinado actualmente por consideraciones prácticas, relacionadas con la estabilidad de las líneas ópticas

durante las influencias externas desfavorables. Resulta que combinando los espejos en una especie de periscopios habituales, pueden hacerse bloques periscópicos mucho menos sensibles a las influencias externas fortuitas, que los espejos o lentes corrientes.

En el Instituto de Física de la Academia de Ciencias de la URSS

A. M. Prójorov y su antiguo colaborador, A. I. Barchukov, con su gran aptitud para hallar nuevas posibilidades en las teorías y las elaboraciones, utilizaron una línea de espejos en su láser. Este láser, que utiliza gas carbónico, trabaja en la gama infrarroja y en la onda de 10 micronos aproximadamente. Tales láseres pueden generar grandes potencias, pero su longitud a menudo supera 100 metros. Con el fin de economizar espacio, se les "componía", generalmente, de segmentos sueltos, así que el resonador del láser contenía gran cantidad de espejos. Esto empeoraba la calidad del resonador, dificultaba mucho su ajuste y lo hacía muy sensible a las sacudidas y otras influencias externas.

Prójorov y Barchukov decidieron sustituir el resonador por una línea óptica, formada por espejos especiales. Para lograrlo, era suficiente con quitar los espejos de los extremos que daban a las antiguas estructuras las propiedades del resonador. Desde luego, el láser perdía la capacidad de generar; de un generador cuántico óptico se transformaba en un amplificador cuántico óptico.

Pero era eso lo que Prójorov y Barchukov trataban precisamente de conseguir. Ellos diri-

gieron hacia ese amplificador la radiación de un láser del mismo tipo con potencia relativamente baja, pero de alta calidad. Su longitud alcanzaba nada más que cerca de tres metros. Era muy seguro y estable. El amplificador largo, que había heredado todas las ventajas de la línea cuasióptica ante el resonador, resultaba muy fiable y cómodo. Pues sólo se diferenciaba de una línea de espejos corriente en que entre los espejos de ésta estaban situados tubos con gas carbónico, el cual se excita mediante descargas eléctricas. Merced a este interesante hallazgo, Prójorov y Barchukov pudieron "colocar" su enorme láser en un "estante" que se podía situar fácilmente en un pequeño local del laboratorio.

Una de las aplicaciones originales del método cuasióptico fue elaborada por Natalia Alexándrovna Irisova en el laboratorio de Prójorov. Ella se planteó la tarea de crear medidas en las gamas de radioondas milimétricas y submilimétricas, que apenas estaban asimiladas.

En estas gamas, los métodos de medición de la radiotécnica clásica pierden totalmente la fuerza por la simple razón de que las dimensiones de los ondámetros, líneas de medición y otros dispositivos y piezas, necesarios para efectuar las mediciones, pasan a ser demasiado pequeñas. Tan pequeñas, que es muy difícil fabricarlos con la precisión debida. Pero aunque se hiciesen, su utilización no daría efecto alguno. Se necesita una sintonización demasiado precisa — el ajuste — como dicen los ópticos y también los radiofísicos, que ya han penetrado en esta región limítrofe. El factor de calidad de los resonadores de cavidad superminiaturizados se hace intolerablemente pequeño. En una palabra, el intento de limitarse con una simple modificación

de las dimensiones, conservando los principios generales, no conduce a nada bueno.

Precisamente aquí, en la gama que se encuentra entre el reino de los ópticos y el Estado de los radistas, es natural desarrollar los métodos cuasiópticos y crear analogías específicas de instrumentos ópticos.

No obstante, lo que ya estaba hecho para la gama de ondas centimétricas, aquí no servía. No existían materiales transparentes adecuados para preparar buenas lentes. No había con qué hacer espejos semitransparentes para los interferómetros. Hubo que comenzar todo de nuevo. El principal elemento de la mayoría de los instrumentos de Irisova eran unas pequeñas mallas hechas de alambre metálico muy fino. Son tan finísimas, que los bastidores donde están tendidas parecen que están vacíos.

Las redecillas son transparentes para la luz porque entre los alambres que tienen un grosor tan sólo de varias decenas de micrones se dejan unos espacios con la misma anchura que el grosor de los alambres. Estos intervalos son transparentes también para las ondas hertzianas con las que trabaja Irisova y son transparentes para las ondas polarizadas a través de los alambres. Mas basta con girar la malla en noventa grados para que ésta comience a reflejar las ondas lo mismo que si estuviese hecha entera de metal. En este caso, la onda hertziana excita en los alambres corrientes eléctricas que extinguen la onda incidente y engendran la onda reflejada que va en sentido contrario.

Si giramos la malla de tal modo que los alambres vayan en un sentido intermedio, ésta en parte refleja y en parte deja pasar la onda incidente. Así es cómo una simple y pequeña malla tra-

baja en calidad de divisor dirigido de potencia.

Con ayuda de dos mallas paralelas, Irisova construyó un resonador, submilimétrico análogo al interferómetro óptico de Fabry y Perot, que permitía medir precisa y cómodamente la longitud de ondas incidentes al resonador.

Este no es un lugar apropiado para describir todas las piezas cuasiópticas inventadas y elaboradas por ella y sus colaboradores. Tomándolas como base, se construyó un espectroscopio, cuyos parámetros superan considerablemente las características de todos los demás instrumentos de fabricación nacional y extranjera, conocidos hasta hoy día y construidos a base de piezas tradicionales.

Irisova y sus colaboradores, además de ser los creadores de estos magníficos instrumentos, son también los primeros que les han dado aplicación. Utilizan ya sus instrumentos con fines de investigación y han obtenido numerosos e interesantes datos sobre las propiedades de distintas sustancias en la gama que todavía están asimilando y en la que penetran por la parte de las ondas hertzianas encontrándose cada vez más con los láseres.

La mayoría de las particularidades de las líneas de comunicación a base de espejos y lentes, así como también, por otra parte, la capacidad del resonador abierto de retener dentro de sí la energía de ondas luminosas, se debe a la existencia de cáusticas. Así se denominan las superficies imaginarias que se diferencian porque a éstas les están tangentes todos los rayos que pasan a través de un par de lentes o que van de un espejo a otro. Semejantes superficies pueden observarse ya en las construcciones geométricas de Huygens y Descartes.

Si todos los rayos de luz vienen tangentes a una superficie, esto significa que no la atraviesa ninguno de ellos. Entonces la luz no pasa a través de la superficie, incluso si la misma es una figura geométrica imaginaria. Eso es precisamente aquella pared abierta del resonador abierto o de la línea óptica abierta, de la que tantas veces ya tratamos más arriba. Pero los razonamientos de la óptica geométrica, que describen correctamente la situación en rasgos generales, no pueden explicar la causa del surgimiento de las cáusticas ni la distribución real del campo electromagnético cerca de la cáustica. En cambio, la teoría ondulatoria puede. Esta demuestra cómo las cáusticas surgen debido a la interacción (interferencia) de las ondas reflejadas de la superficie de un espejo o que pasaron a través de una lente, y de las ondas, que se difractan en su límite.

Los métodos cuasiópticos de cálculo, que es la combinación de los métodos ondulatorios y geométricos, permiten que esto se observe con todos los detalles. Sentir cómo se forma el límite real e invisible del resonador abierto. El límite cerca del cual el campo intenso, que existe dentro del resonador, disminuye suave pero rápidamente, hasta cero. Lo mismo sucede cerca de las superficies invisibles laterales, que limitan las líneas de transmisión abiertas.

Los métodos cuasiópticos sólo recientemente mostraron su poderío en la gama visible e infrarroja de las ondas luminosas. Las piezas y dispositivos cuasiópticos están utilizándose cada vez más en la gama de ondas hertzianas milimétricas y submilimétricas. La cuasióptica ha adquirido amplios derechos de ciudadanía.

CONCLUSION

La cadena del tiempo

¡La cadena! Es posible que ningún concepto haya logrado aplicaciones tan diversas. Aplicaciones buenas y malas, que sirvan a las necesidades vitales y a los caprichos pasajeros. Por lo demás, casi lo mismo puede decirse también de la cuerda, de la que no se acostumbra a hablar en ciertas casas. Mas esta misma ha salvado la vida a muchos alpinistas. Y hay que estar uno mismo en la montaña para poder comprender cómo el valiente, que sube el primero, siente, a través de la cuerda, el apoyo de su compañero que se encuentra abajo.

La humanidad vivió durante muchos siglos volviendo la cara hacia los sabios antiguos. Sus creaciones prestaban fiel servicio a los descendientes, apoyando su movimiento paulatino por las vías del progreso, igual que las cadenas forjadas sujetan el puente colgante. Pero hubo tiempos cuando los antiguos cánones se convertían en perversas cadenas que apresaban las ideas de los hombres. Fueron necesarios esfuerzos heroicos y hasta víctimas para poder romper estas cadenas, deshacerse de ellas, y, a través de la época del Renacimiento, salir al vasto espacio de los tiempos modernos. Entrar en la época, cuya vida se determina cada vez más no por la acción de personas aisladas, sino por el trabajo creador de las masas. Así es cómo se van forjando poco a poco las nuevas relaciones, que cohesionan a cada uno con los demás, prestan apoyo a los in-

novadores, dan seguridad a los rezagados e ilimitado vigor a la humanidad.

Lo que acabamos de decir puede confirmarlo cualquiera con muchísimos ejemplos de su propia experiencia, de lo que han contado personas experimentadas y con las lecciones de historia. A mi modo de ver, donde mejor se materializan los vínculos de las generaciones es en el desarrollo de la ciencia y la técnica, con sus avances impetuosos, sus saltos precipitados y sus épocas de estancamiento.

Herón de Alejandría, uno de los eminentes sabios de la antigüedad, describió muchos dispositivos que utilizaban la fuerza del vapor, tanto como objeto de entretenimiento como para abrir las pesadas puertas de los templos. Se necesitaron diecisiete siglos para que surgieran las condiciones necesarias y el vapor viniese en ayuda de los voluminosos motores hidráulicos y eólicos. No era de extrañar que las primeras máquinas a vapor, que trabajaban automáticamente, sin la participación del hombre, hayan aparecido en las regiones industriales de los Urales e Islas Británicas, es decir, donde más lo exigían las circunstancias.

La máquina a vapor produjo la revolución industrial. Esto lo sabe cualquiera. Engendró también una nueva rama de la ciencia, la termodinámica. El paso de las relaciones feudales y la producción manufacturera al capitalismo, es un efecto indudable de la aparición de la máquina a vapor. En el transcurso de cien años, la potencia de la máquina a vapor aumentó de cinco caballos de vapor a veinte mil; su rentabilidad creció casi cien veces. Engendró las enormes turbinas de vapor, las bombas de chorro de vapor y los martinetes a vapor.

Sus descendientos no se rinden a la electricidad. Concertaron una alianza con el átomo. Pues, hasta hoy día, las centrales atómicas no pueden pasar sin turbinas de vapor. Y no importa el que en estas turbinas no trabaje el vapor de agua, sino el de sodio u otros elementos.

Transmisión... He preguntado a muchos conocidos sobre el significado de esta palabra. La mayoría de ellos contesta que es la denominación técnica de la caja de cambio del automóvil, es decir, la caja de velocidades. Sólo algunos recuerdan que en años pasados este nombre se daba a un voluminoso sistema de transmisión desde el motor hacia las máquinas herramientas. La principal pieza de la transmisión era un árbol largo fijado debajo del techo del taller. Anchas correas de cuero cosidas en forma de aro unían las poleas ajustadas en las transmisiones con las poleas que hacían girar los tornos. Otra correa, pero mucho más gruesa y ancha, unía del mismo modo la transmisión con la máquina a vapor y, más tarde, con un motor eléctrico que prestaba servicio a todo el taller.

No obstante, la transmisión existía mucho antes del comienzo de siglo de vapor. Esta unía los rudimentarios tornos de las primeras manufacturas con los motores hidráulicos. ¡Cuántas mutilaciones y cuántas muertes causaron sus correas!

La segunda revolución industrial realizada por la electricidad, provocó la expulsión de las transmisiones de los talleres. La máquina a vapor apartó a la fábrica del río. El motor eléctrico, barato y seguro, desalojó la transmisión, que fue sustituida por el accionamiento eléctrico individual.

¡Mas la electricidad no se limitó a una victoria! Penetró en el sanctasanctórum de la producción industrial. El vapor daba solamente fuerza mecánica. Todo lo demás, en medida esencial, seguía siendo sin cambiar: las cuchillas, las brocas y las sierras. Mas la electricidad tiende también a desplazar estas herramientas. La chispa eléctrica puede cortar, taladrar y pulir. La corriente eléctrica separa de los minerales el aluminio y otros metales, fabrica abonos y produce ácido nítrico del aire, alumbra calles y casas, refrigera locales y víveres.

Y he aquí que la electricidad ha engendrado el láser. El brillante rayo láser ha atraído de repente la atención general. Para incorporar al láser a la vida laboral, pasarlo del laboratorio al taller, a las obras de construcción, a la central telefónica, al buque, al avión y al cosmos, los hombres de ciencia e ingenieros necesitaron unos cuantos años solamente, y no siglos como en el caso del vapor ni tampoco los cien años que se necesitaron para recorrer el camino que separa la pila de Galvani del primer motor eléctrico.

Cuando yo escribía mis primeras obras sobre los creadores de la electrónica cuántica — *Ideas locas* y *Las transformaciones del hiperboloide del ingeniero Garin* — los físicos norteamericanos competían en ingenio, dando interpretaciones burlescas al vocablo "máser".

En vez de la expresión inicial "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation", que significa "Amplificación de microondas por emisión estimulada de radiaciones", aparecieron tales como "More Applied Scientists Eat Regular" ("Hay más sabios que se dedican a ciencias aplicadas que comen regularmente"), o "Military Application Seems Extremely Re-

mote" ("Las aplicaciones militares parecen ser muy alejadas") y algunas otras.

Y he aquí que la última frase cambió de repente adquiriendo un sentido amenazador. En vez de la palabra "Remote" apareció "Real".

En una serie de ediciones periódicas de algunos países, ediciones que no se dedican a la ciencia ni a la técnica, sino a la política y la economía, apareció en 1970 un comunicado, aunque en distintas variantes, cuyo sentido se reducía a lo siguiente: "Con el rayo láser fue derribado un avión en el polígono del Estado de Nevada".

El núcleo atómico salió de los muros del laboratorio el 16 de julio de 1945, dándose a conocer con un siniestro destello en el polígono del Estado de Nuevo México. Apenas había pasado un mes, cuando por voluntad de los mayores reaccionarios de la élite gobernante norteamericana, sin que hubiese necesidad militar alguna y en beneficio de la nueva diplomacia nuclear, dos bombas atómicas segaron muchísimas vidas en las ciudades de Hiroshima y Nagasaki.

Y sólo superando grandes obstáculos, a despecho de la exasperada resistencia del complejo industrial-militar, la energía del núcleo atómico penetró en la vida pacífica del país, patria de la bomba atómica.

Los científicos soviéticos tuvieron que esforzarse mucho y nuestro país tuvo que invertir enormes medios para liquidar el monopolio atómico y el chantaje atómico relacionado con éste. Nosotros no sólo alcanzamos este objetivo, sino que fuimos los primeros en liberar la inmensa energía de la síntesis termonuclear y también los primeros en construir una central atómica, cosa que no es menos importante.

El átomo vino de la guerra a la paz y las gentes de la Tierra tienen que tomar todas las medidas necesarias para que el láser no pase de los fines pacíficos al servicio de la agresión.

Donde primero se aplicó el láser, quizá fuese en la medicina, la rama más humana entre todas las existentes. Algunas enfermedades de la vista conducen al desprendimiento de la retina. La persona pierde la vista. En la época anterior al láser, había que recurrir a complejas intervenciones quirúrgicas. Y los oculistas, con ayuda de los físicos, se pertrechan con el láser; es decir, el láser ocupa el lugar del escalpelo. A esta idea les impulsó la propiedad enfocadora que posee el cristalino del ojo. Pues el cristalino es una lente que reúne en un punto el haz de rayos paralelos. Así es cómo en la retina se forma la imagen del mundo externo. En el nuevo experimento había que lograr que el cristalino enfocase el rayo láser en los puntos totalmente determinados de la zona afectada de la retina. Tanto los médicos como los físicos comprendían perfectamente que el fallo conduciría a la afección de la parte sana de la retina. Mas, quien no se arriesga no pasa la mar. Se trata de riesgo sensato, justificado y calculado. Los físicos se dedicaron, precisamente, a efectuar este cálculo.

Después de realizar una serie de experimentos, ellos inventaron un sistema optico especial que dirige estrictamente por línea recta el rayo láser y la luz de una pequeña lámpara auxiliar. Dicho sistema sirve para efectuar la puntería. Cuando todo está ya listo, el médico aprieta un botón y, bajo la influencia del calentamiento de los tejidos, transcurre la coagulación de los tejidos que afianzan la retina con la pared posterior del ojo. Esto hace recordar algo la

soldadura por puntos de los metales. El paciente no siente dolor alguno. El medio transparente del ojo no absorbe la luz, no siente calentamiento ni afección, pues a través de él pasa el rayo láser no enfocado, de modo que la densidad de la energía en él no es muy alta.

Tras las delicadas operaciones sin pérdida de sangre se encuentran los interminables experimentos efectuados con los ojos de cadáveres, y después, con los ojos de animales. Sólo después de una minuciosa comprobación, el láser recibió el permiso de entrar en el gabinete médico.

La radioelectrónica hace tiempo que ha pertrechado a los cirujanos con un cuchillo que no derrama sangre. Este era un cuchillo de alta frecuencia, que funciona por el principio de la coagulación de los tejidos como resultado de su calentamiento con corrientes de alta frecuencia. Mas, por desgracia, dicho cuchillo no tiene aplicación universal. En muchos casos, el calentamiento de los tejidos fuera de los límites del campo operacional es totalmente intolerable. Y en estos casos, igual que antes, reina el escalpelo.

La radiación del láser puede ser enfocada en un haz extraordinariamente estrecho. Este instrumento intangible puede penetrar a lugares donde el roce con el escalpelo se consideraba justificado debido a que los médicos no poseían nada mejor.

Hay otra rama de la medicina, en la que el láser da sus primeros pasos, y muy prometedores. Nos referimos al tratamiento de algunas enfermedades cutáneas, incluyendo también el terrible cáncer de la piel. En algunos casos, el rayo no enfocado de un láser potente provoca la

desintegración de las células afectadas, sin perjudicar las sanas.

Esto lo aprovecharon también los cosmetólogos, quienes, con ayuda del láser, eliminan exitosamente los lunares oscuros y las huellas de los tatuajes, tan deseados por algunos muchachos en los años juveniles, pero que después causan solamente incomodidades y vergüenza en años más maduros.

El láser permite efectuar también otras operaciones muy delicadas. Estas son los puestos avanzados de la medicina. En los laboratorios de los genéticos, el láser modifica las propiedades hereditarias de los protozoos unicelulares. Con su ayuda, los científicos esperan descifrar el código hereditario de las plantas y los animales, provocar mutaciones dirigidas y, con esto, reducir considerablemente el largo y laborioso proceso de selección de las especies de plantas y animales.

Millones de personas que miran la teletransmisión de Moscú no sospechan de que la torre de televisión de Ostánkino, de 500 metros de altura, ha sido erigida con ayuda del láser. El rayo rojo del láser a gas, que trabaja con una mezcla de neón y helio, indicaba a los constructores, con inaudita precisión, la posición del eje vertical de la torre.

Los láseres-constructores ayudan a los hombres en todos aquellos casos en que éstos tienen que trabajar con muchísima precisión y en condiciones complejas. Alivian el trabajo de los agrimensores de minas, verificando la dirección de las excavaciones subterráneas y, a veces, dirigiendo el movimiento de los escudos de perforación de túneles. Mantienen el declivo dado al abrir canales, ayudan a construir ferrocarriles,

carreteras y pistas de despegue y aterrizaje de los aeródromos.

La necesidad de medir distancias surgió ante la humanidad en la remota antigüedad. En Egipto, donde los desbordamientos del Nilo suscitaban la necesidad de restablecer cada año los límites de las parcelas, las obligaciones de los agrimensores las desempeñaban los sacerdotes. En otros países agrícolas la profesión de agrimensor era también antaña y honorable. Este agrimensor, armado con conocimientos de geometría y sus simples instrumentos, llegó hasta nuestros días. Sólo hace relativamente poco — hará unos cuantos siglos — que aparecieron Agrimensores con letra mayúscula: topógrafos y cartógrafos que tenían como campo de actividad países y continentes, todo el globo terráqueo.

Sus instrumentos iban perfeccionándose con gran lentitud: reglas graduadas, niveles y brújulas. La confección de mapas precisos es, hasta el momento, una labor muy costosa y trabajosa.

Y aquí, a la par con la aerofotografía, con el empleo de satélites artificiales de la Tierra y los radiotelémetros comienzan a utilizarse con mucha frecuencia los telémetros a láser, aparatos mucho más precisos, ligeros y cómodos en el manejo. El rayo láser ha llegado hasta la Luna y medido la distancia que hay hasta ese satélite con mucha mayor precisión que era posible antes por medio de los mejores telescopios.

Cualquiera que adquiere un reloj se interesa ante todo del número de piedras que contiene. Seguramente que ahora no hay ninguna firma que se arriesgue a lanzar al mercado relojes de pulsera o de bolsillo sin estas piedras, pues no encontrarían compradores. Las piedras, o mejor dicho, los rodamientos, así como algunas otras

piezas importantes, fabricadas de rubí artificial, aseguran al reloj gran precisión y longevidad.

La elaboración de estas piezas minúsculas es un verdadero arte que se ha convertido en una operación en masa. La realizan, por lo general, complejas máquinas automáticas especiales, pero algunas casas suizas prefieren enviar estos rubíes a los países subdesarrollados, donde el trabajo manual es más barato, y traer de allí a Suiza piezas acabadas.

Ahora las complejas máquinas automáticas, así como las vecinas de la Isla de Mauricio cuyos nombres desconocemos, serán sustituidas por nuevos dispositivos, en los que el papel principal lo jugará el rayo láser. Este rayo enfocado hasta el grosor de un cabello humano, hace con facilidad pequeñísimos agujeros no sólo en el rubí, sino también en los diamantes, en los cristalos de borazón, en el carburo de boro y en otros materiales extraduros artificiales.

Los láseres se utilizan también en el taladro de hileras para el trefilado o la formación de hilos polímeros. En el último caso, es frecuente la necesidad de hacer agujeros de forma complicada: ovalados, triangulares y de formas más complejas aún.

¿Pueden imaginarse qué difícil es prepararlos con ayuda de instrumentos corrientes?

El rayo láser soluciona, sin dificultad alguna, otro problema complicadísimo: abre agujeros que no son perpendiculares, sino oblicuos a la superficie de la pieza.

En la técnica surgen con frecuencia problemas que con pleno derecho tienden a recibir el título de rompecabezas. Los ingenieros pensaban abandonar por muchos años ciertos trabajos que requerían soluciones muy complejas, tales

como la soldadura en el vacío y la fabricación de piezas muy precisas. Sin embargo, el láser puede soldar fácilmente dos alambres que se encuentran en un balón de cristal cerrado, del que se ha extraído el aire. Trabaja en un autómata que fabrica resistencias precisas de pequeño volumen para la industria radioeléctrica. En este autómata, el láser vaporiza la película de carbón aplicada a la cerámica. El láser es insustituible también en la producción de micromódulos para la radioelectrónica.

La potencia de los láseres a gas, en los cuales el principal elemento de trabajo es el gas carbónico, puede alcanzar una decena de kilovatios. Esta es suficiente para fundir en el vacío metales refractarios, fundir del mineral metales extrapuros, elaborar la cerámica y realizar muchísimas más operaciones que requieren concentraciones máximas de energía.

El láser está dando los primeros pasos en la industria y la construcción, mas los científicos están seguros de que a él lo espera un gran porvenir en el gobierno de las reacciones químicas y en la creación de nuevos procesos tecnológicos de gran eficacia.

He relatado aquí, aunque en breve, solamente acerca de algunas especialidades nuevas de los láseres. Son, desde luego, muchas más y, además, van aumentando de día en día.

Mi deseo era el de exponer algunos ejemplos que demuestran la flexibilidad y las posibilidades polifacéticas de la técnica del láser. No tengo la menor duda de que mis lectores encontrarán numerosos problemas cuya solución sería más sencilla y eficaz con ayuda del láser, que con los métodos existentes actualmente.

CONTENIDO

A NUESTROS LECTORES:

"Mir" edita libros soviéticos traducidos al español, inglés, francés, árabe, alemán e italiano. Entre ellos figuran las mejores obras de las distintas ramas de la ciencia y la técnica: manuales para los centros de enseñanza superior y escuelas tecnológicas; literatura sobre ciencias naturales y médicas. También se incluyen monografías, libros de divulgación científica y ciencia ficción.

Dirijan sus opiniones a la Editorial "Mir", I Rizhski per., 2, GSP, Moscú I-110, 129820, URSS.